

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DE UN  
CONCRETO ESTRUCTURAL ECOLÓGICO CON FIBRAS PET PROPUESTO  
CONFORME A LA NORMA NSR-10**



**PRESENTA:**

LUIS MIGUEL CABARCAS CAIPA

JOSE DAVID COLPAS MACIAS

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA**

**2020**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DE UN  
CONCRETO ESTRUCTURAL ECOLÓGICO CON FIBRAS PET PROPUESTO  
CONFORME A LA NORMA NSR-10**

**PRESENTA:**

LUIS MIGUEL CABARCAS CAIPA

JOSE DAVID COLPAS MACIAS

**TRABAJO DE GRADO**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

**ASESOR:**

PhD. MARIAN SABAU

**CO-ASESOR:**

Esp. SERGIO PEREZ

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA**

**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

### **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado a mi familia, mis padres porque gracias a ellos y a sus esfuerzos han contribuido en hacer de mí una persona de bien con buenos principios, además de su constante apoyo en todas las decisiones que tomé a lo largo de mi carrera, también se encuentra dedicado a mis hermanos que a pesar de la distancia han estado pendiente de todos mis problemas, me han escuchado y ayudado en la toma de decisiones a lo largo de todo el proceso.

José David Colpas Macías

Quiero dedicar este trabajo de grado principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. A mi hermana por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia por sus consejos y palabras de aliento, de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Luis Miguel Cabarcas Caipa

### **Agradecimientos**

Expreso mis agradecimientos primeramente a la Universidad de la Costa por servirme de apoyo para mi formación profesional, por ser el centro de mis estudios en todo este tiempo y gracias a ella aprendí lecciones inolvidables, al ingeniero Marian Sabacú por darme el apoyo de tutor así como siempre estar pendiente ayudando y colaborando en este trabajo de grado, a la empresa CONSULTECH S.A.S en cabeza del ingeniero Giuseppe Mancini y la ingeniera Nira por apoyarnos al prestar sus instalaciones de su laboratorio para poder culminar todos los ensayos correspondientes, al ingeniero Diego Borrero por su ayuda de gestión para finalizar el trabajo de grado, a mi compañero de tesis Luis Miguel Cabarcas por toda su colaboración prestada para sacar adelante este proyecto, a los ingenieros William De La Cruz y Habid Santiago encargados del laboratorio de la Universidad de la Costa por su colaboración y acompañamiento en el proceso, al ingeniero y amigos de estudio Juan David Ramos Amador por apoyarnos en el proceso de la tesis de grado colaborándonos y tener siempre la disposición y finalmente agradecer a los ingenieros Sebastián Fernández, Mateo David Castro, Jair Simanca y la ingeniera Jheilyn Mesino ya que cada uno hizo lo posible para ayudar en cada momento del proceso.

José David Colpas Macías

Agradezco a la Universidad de la Costa por acompañarme y guiarme durante toda mi formación profesional, a los docentes e ingenieros que me orientaron con su conocimiento y experiencia. Al ingeniero Marian Sabau por guiar esta investigación y brindar su apoyo como tutor para culminarla. A la empresa CONSULTECH S.A.S por prestar sus instalaciones y equipos para la finalización de los ensayos estipulados. A mi compañero de tesis y amigo José David Colpas por todo el aprendizaje obtenido durante esta investigación. Y a mis amigos y colegas Juan David Ramos, Jheilyn Mesino, Sebastián Fernández y Jair Simanca, por apoyar la realización de este trabajo y por el equipo formado durante los 5 años de nuestra preparación profesional.

Luis Miguel Cabarcas Caipa

### Resumen

En este trabajo de investigación se planteó la viabilidad de hacer uso del tereftalato de polietileno (PET) de envases de plástico como adición de fibras en mezclas de concreto en proyectos de construcción, para contribuir con el medio ambiente sin disminuir la calidad de las construcciones. El análisis se basó en la elaboración de un diseño de mezcla para un concreto convencional bajo la norma ACI 211.1 y el método de Fuller, al cual se le adicionaron fibras tanto comerciales de la marca Toxement, como de desechos de envases de plástico PET de bebidas, para luego someterlos a pruebas de compresión y flexión a las edades de curado de 4, 7 y 28 días. Las probetas fueron ensayadas en los laboratorios de la Universidad de la Costa y la empresa Consultech S.A.S. Con base en los resultados obtenidos, se calcularon los principales indicadores estadísticos para el análisis respectivo. Los resultados obtenidos muestran que los concretos con 0,2% en volumen de fibras PET presentaron una reducción de 9,89% de la resistencia a la compresión con respecto al concreto de control, pero al aumentar el porcentaje de fibras PET a 0,35%, la reducción de la resistencia a la compresión disminuye a solo 6,5% en comparación con el concreto de control. Sin embargo, se logró mantener la resistencia a flexión ya que las fibras mejoran la ductilidad y tenacidad del concreto, por lo cual se recomienda su uso para el control de la fisuración por retracción plástica.

**Palabras clave:** Concreto, fibras PET, resistencia a compresión, resistencia a flexión, edad de curado

### **Abstract**

In this research, the feasibility of using polyethylene terephthalate (PET) from plastic containers as an addition of fibers in concrete mixtures in construction projects was studied, in order to contribute to the environment without reducing the quality of constructions. The analysis was based on the elaboration of a mix design for a conventional concrete under the ACI 211.1 standard and the Fuller method, to which both commercial fibers from the Toxement brand and recycled fibres from PET plastic containers were added, and then subjected to compression and bending tests at curing ages of 4, 7 and 28 days. The specimens were tested in the laboratories of Universidad de la Costa and the company Consultch S.A.S. Based on the results obtained, the main statistical indicators were calculated for the respective analysis. The results obtained show that the concretes with 0.2% by volume of PET fibers presented a reduction of 9.89% in the compressive strength with respect to the control concrete, but when the percentage of PET fibers increased to 0.35 %, the reduction in compressive strength decreases to only 6.5% compared to control concrete. However, it was possible to maintain the flexural strength since the fibers improve the ductility and toughness of the concrete, so its use is recommended to control plastic shrinkage cracking.

**Keywords:** Concrete, PET fibers, compressive strength, flexural strength, curing age



**Contenido**

Lista de Tablas y Figuras	11
1. Introducción	14
2. Planteamiento del problema	16
3. Justificación	17
4. Objetivos	18
4.1 Objetivo general	18
4.2 Objetivos específicos	18
5. Marco referencial	19
5.1 Marco teórico-conceptual	19
5.1.1 Concreto hidráulico	19
5.1.1.1 Cemento Portland	19
5.1.1.2 Agregados	20
5.1.1.3 Agua	20
5.1.1.4 Aditivos	21
5.1.2 Fibras utilizadas para fabricación de concreto	21
5.2 Estado del arte	27
6. Diseño metodológico	34
7. Programa experimental	38
7.1 Selección de materiales	38
7.2 Procesamiento de fibras PET.	39
7.2.1 Recolección y transporte de material PET.	39
7.2.2 Clasificación inicial	39
7.2.3 Elaboración de fibras PET.	40
7.2.3.1 Cortado del fondo y el área de la tapa.	40

FISICO-MECANICOS EN CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS PET	10
7.2.3.2 Cortado en tiras de fibra	40
7.3 Caracterización de materiales	41
7.3.1 Características generales	41
7.3.1.1 Cemento Portland	41
7.3.1.2 Agregado grueso natural.	42
7.3.1.3 Agregado fino natural.	44
7.3.1.4 Fibra sintética.	45
7.3.1.5 Fibra reciclada PET.	46
7.3.2 Ensayos a los materiales	48
7.3.2.1 Humedad de los agregados	48
7.3.2.2 Granulometría de los agregados	49
7.3.2.3 Masa unitaria de los agregados.	55
7.3.2.4 Densidad relativa y absorción de los agregados	60
7.3.2.5 Resumen de las propiedades de los agregados.	63
7.5 Diseño y elaboración de mezcla	64
7.5.1 Diseño de mezcla método ACI del comité 211.1	64
7.5.2 Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto	70
7.5.2.1 Equipos y herramientas.	70
7.5.2.2 Procedimiento de elaboración del concreto.	71
7.5.2.3 Procedimiento de ensayos del concreto.	75
8. Resultados y discusiones	77
9. Conclusiones	88
Referencias	90

## Lista de Tablas y Figuras

### Tablas

Tabla 1. Normas correspondientes a los ensayos de los materiales	35
Tabla 2. Cantidad de probetas cilíndricas y viguetas	36
Tabla 3. Ensayos al concreto en estado fresco y endurecido	37
Tabla 4. Características generales de los materiales a adicionar al concreto	38
Tabla 5. Especificaciones técnicas del cemento de uso general Argos	42
Tabla 6. Características generales del agregado grueso natural	43
Tabla 7. Características generales del agregado fino natural	44
Tabla 8. Especificaciones técnicas las fibras sintéticas Toxement	45
Tabla 9. Características generales de las fibras PET	47
Tabla 10. Datos y resultado de ensayo de humedad agregado grueso natural	49
Tabla 11. Datos y resultado de ensayo de humedad agregado fino natural	49
Tabla 12. Masa mínima para ensayo de granulometría del agregado grueso	50
Tabla 13. Números de tamices para ensayo de granulometría	51
Tabla 14. Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla	52
Tabla 15. TM Y TMN obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla	52
Tabla 16. Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado fino (Arena)	54
Tabla 17. Módulo de finura (Arena)	54
Tabla 18. Molde para ensayo de masa unitaria	56
Tabla 19. Dimensiones del recipiente para ensayo de masa unitaria	56
Tabla 20. Datos y resultados del ensayo de masa unitaria suelta en agregados finos y gruesos	59
Tabla 21. Datos y resultados del ensayo de masa unitaria compactada en agregados finos y gruesos	59
Tabla 22. Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural	61
Tabla 23. Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural	62
Tabla 24. Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural	62
Tabla 25. Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural	63

Tabla 26. Resumen general de las propiedades de los agregados a utilizar en la elaboración de concretos	63
Tabla 27. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximo de agregados	64
Tabla 28. Requerimientos aproximados de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido	65
Tabla 29. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar	66
Tabla 30. Gradación de materiales metodología de Fuller Thomson	67
Tabla 31. Estimación de proporción de los agregados	68
Tabla 32. Corrección debido a la humedad de los agregados según el agua que apropián a la mezcla	69
Tabla 33. Proporción de mezcla de concreto	69
Tabla 34. Resumen de cantidades de materiales necesarios para mezcla de concreto por metro cubico	70
Tabla 35. Resultados ensayo de asentamiento	77
Tabla 36. Promedio de densidades cilindros ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	78
Tabla 37. Promedio de densidades viguetas ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	79
Tabla 38. Promedio de resistencias de cilindros 15 x 30 cm (MPa) y desviación estándar (MPa)	79
Tabla 39. Promedio de resistencias de cilindros 10 x 20 cm (MPa) y desviación estándar (MPa)	80
Tabla 40. Promedio de resistencias de viguetas (MPa) y desviación estándar (MPa)	80

## Figuras

Figura 1. Bolsa de cemento portland hidráulico	20
Figura 2. Fibra sintética Toxement	22
Figura 3. Concreto con fibras metálicas	23
Figura 4. Fibra de vidrio marca Sika	24

Figura 5. Macrofibras metálicas, sintéticas y de vidrio	25
Figura 6. Microfibras sintéticas	26
Figura 7. Corte del área del fondo y tapa del envase	40
Figura 8. Resultado final de las fibras	41
Figura 9. Agregado grueso natural	43
Figura 10. Saco de agregado fino natural	44
Figura 11. Macro fibra Toxement TUF STRAND MAXTEN	46
Figura 12. Fibras recicladas PET	47
Figura 13. Curva granulométrica del agregado grueso natural (Gravilla)	53
Figura 14. Curva granulométrica agregado fino natural – Arena de Santo Tomas	55
Figura 15. Recipiente para ensayo de masa unitaria	57
Figura 16. Ensayo de masa unitaria compactada de agregado grueso	60
Figura 17. Ensayo de cono para humedad superficial	61
Figura 18. Ensayo del agregado grueso natural sumergido	62
Figura 19. Correspondencia entre la resistencia a compresión y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo 1 en concretos sin aire incluido	66
Figura 20. Mezclado de agregados con fibra sintética Toxement	72
Figura 21. Mezclado de agregados con fibra reciclada PET	72
Figura 22. Realización del ensayo de asentamiento	73
Figura 23. Fraguado de concreto de control	74
Figura 24. Desencofrado de especímenes concreto de control	74
Figura 25. Curado en tanque de especímenes de concreto	75
Figura 26. Ensayos de cilindros en laboratorio de tecnología de los materiales de la Universidad de la Costa	76
Figura 27. Gráfico de barras ensayos de asentamiento para los concretos	77
Figura 28. Gráfico de barras ensayos de resistencia a la compresión de los concretos	82
Figura 29. Gráfico de barras ensayos de resistencia a la flexión de los concretos	84

## **1. Introducción**

La disposición final de los residuos, producto de la actividad humana, se ha convertido en un problema de grandes proporciones que demanda atención inmediata. Es entonces que a raíz de las iniciativas en los altos poderes mundiales y como consecuencia de las presiones sociales por tener entornos más limpios y sustentables, la comunidad científica se ha dado la tarea de analizar el uso de materiales alternativos en los procesos de construcción.

Dentro de este contexto, surge entonces la idea de dar uso de materiales de desecho en las mezclas de concreto como una forma de cumplir con el objetivo ecológico de dar una disposición final a parte de estos materiales. No obstante, considerando que el concreto cumple una función vital en la construcción de la infraestructura moderna por sus características, se hace necesario que se conozca el impacto que tiene la adición de estos materiales de desecho en las propiedades del concreto.

Por esta razón el presente estudio busca conocer cómo se comporta una mezcla de concreto al adicionar un porcentaje de tereftalato de polietileno (o más conocido como PET), que es un producto que se utiliza en los envases plásticos y el cual son desechados por la humanidad sin saber su disposición final.

Para realizar este análisis se considera la norma técnica colombiana la cual se emplea para la realización de la caracterización de los materiales, como también en la elaboración de probetas y el análisis de resultados de resistencias a la compresión y flexión que se ejecutó en las instalaciones de la universidad de la costa y el laboratorio de la empresa CONSULTECH S.A.S.

Para la elaboración y presentación de la investigación se estructuró en diferentes ítems en donde primeramente se aborda el problema, se establecen los objetivos del estudio, tanto el general como los específicos, y se expone la justificación.

Seguidamente se presenta una segunda etapa en donde se expone marco teórico en el cual se presentan todos los antecedentes de la investigación que fueron consultados, las bases teóricas, la definición de términos básicos. Posteriormente, se presenta el diseño metodológico en donde se especifica las diferentes fases para la elaboración del estudio de los concretos a realizar para observar el alcance de la investigación.

Además, se elaboró la caracterización y diseño de mezcla del concreto para así lograr realizar la fase experimental de la investigación en donde se realizaron todas las muestras y obtener los resultados.

Finalmente se elaboró el análisis de resultado donde se plasmaron y analizaron los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, lo que permitió generar las conclusiones y recomendaciones del estudio que se obtuvieron y que da respuesta a la interrogante sobre la viabilidad del uso del tereftalato de polietileno como material alternativo para la producción de concreto.

## **2. Planteamiento del problema**

El concreto estructural es la combinación de diferentes materiales como lo son cemento, agregado grueso, agregado fino y agua. El cual puede ser empleados en diferentes elementos constructivos tales como: zapatas y muros, cimentaciones simples y reforzadas, vigas y muros armados, cisternas y canales, estructuras en general. Así podemos observar que para la construcción de estos elementos diariamente la demanda que se da de concreto es muy grande, generado un grave impacto ambiental ya que al utilizar materiales como los agregados estos tienen que ser extraídos mediante la explotación de recursos naturales no renovables.

También así otra problemática muy grande a nivel mundial que se está viviendo es la contaminación al medio ambiente, la cual las zonas costeras se han visto significativamente afectadas. Este es un problema global que aumenta de forma alarmante, pues gran parte de la contaminación presente en playas y océanos es generada por las acciones del hombre y una poca conciencia por preservar el ecosistema. Aun conociendo la gravedad de las consecuencias, muchas veces damos prioridad a los tiempos de recreación o descanso, y olvidamos la responsabilidad que tenemos frente al cuidado y protección de nuestro entorno natural. Así como hace referencia que los micro plásticos pueden ser ingeridos por crustáceos y peces, e incluso por el plancton, causando problemas a la fauna animal por su presencia en el intestino y los contaminantes químicos que llevan. Además, pueden pasar a lo largo de la cadena alimentaria hasta llegar a nuestros platos (Barrios, 2019).

Como en las playas de la comunidad de Puerto Colombia, Atlántico. Según lo que expresó la secretaria de turismo Anny González Altahona, señala que la administración municipal es consciente de que las playas están sucias, y explica que esto se debe a que el río



Magdalena arrastra basuras que van a parar a la zona, a esto se suman los desechos generados por las lluvias registradas (Perez, 2018). Dice que un arroyo que llega al mar también lleva muchos desechos a la zona, a esto se suman los desechos generados por las lluvias registradas (Perez, 2018). Así como también otro motivo es que las personas o los llamados turista en su mayoría arrojan desechos no biodegradables como lo son los pasticos, las botellas PET, productos desechables, botellas de vidrio, empaques de alimentos, etc. Provocando así un deterioro en el ecosistema de la zona, específicamente resultando afectada a la fauna marina, lo que conlleva a bajar la calidad de vida en los alrededores en términos de la salud y economía de las personas.

¿Podría utilizarse los envases plasticos (PET) como un tipo de adición de fibra en los concretos para lograr disminuir en la contaminación ambiental presente en las zonas costeras del Municipio de Puerto Colombia y a su vez no afectar las propiedades del concreto?

### **3. Justificación**

Al realizar el concreto reciclado con fibras PET se está buscando reducir los residuos contaminantes que afectan el medio ambiente en las zonas costeras del municipio de Puerto Colombia. También se puede llegar a reducir el impacto ambiental que producen las obras civiles por sí mismas, haciendo que las estructuras construidas por un concreto con fibras de envases PET sean acogidas por un modelo de desarrollo sostenible, siendo esta una iniciativa de modelo de consumo.

En Colombia como en el mundo cada vez se escucha más la palabra desarrollo sostenible que busca el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el

bienestar social, esto podemos relacionarlo con muchos proyectos que quieren incluirlo para mejorar la sostenibilidad del planeta (Morales, 2018). Este proyecto busca reducir los residuos contaminantes no biodegradables mediante su utilización como material de construcción para proyectos de infraestructura y así mitigar el impacto ambiental en las zonas costeras del municipio de Puerto Colombia.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

- Analizar las propiedades mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido con base a un diseño ecológico de 3000 psi con fibras de botellas PET, que cumpla con los requisitos de la norma NSR-10.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Reducir y recolectar materiales desechables PET no biodegradables de las zonas costeras de Puerto Colombia, para posteriormente volverlos fibras.
- Diseñar las mezclas de concreto ecológico con fibras PET de 3000 PSI.
- Fabricar probetas cilíndricas y prismática de concreto ecológico con fibras PET.
- Realizar ensayos a compresión y a flexión de las probetas de concreto previamente propuesta para su posterior análisis.
- Realizar un análisis comparativo entre las fibras sintéticas y las fibras PET.

## **5. Marco referencial**

### **5.1 Marco teórico-conceptual**

#### **5.1.1 Concreto hidráulico**

Los concretos hidráulicos son ideales en las construcciones de edificaciones de cualquier índole ya que una de sus grandes ventajas es que en estado fresco son capaces de adquirir cualquier forma que se le desea dar con la ayuda de formaleas para lo cual se ha vuelto un material bastante versátil en el sector de la construcción.

El concreto hidráulico, en términos generales, puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (De Guzman Sanchez, 2001).

Como se mencionó anteriormente el concreto hidráulico es la combinación de diferentes materiales como lo son:

##### **5.1.1.1 Cemento Portland**

El cemento que se utiliza como dice el título es el cemento Portland hidráulico, el cual tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar (De Guzman Sanchez, 2001). Por lo general el cemento siempre viene en presentaciones de bultos de diferentes pesos como podemos observar en la Figura 1.



*Figura 1.* Bolsa de cemento portland hidráulico. Fuente: (UMACON S.A., 2017)

#### **5.1.1.2 Agregados**

Los agregados cumplen una función muy importante en los concretos hidráulicos la razón principal de la utilización dentro de una mezcla de concreto, es que esto actúa como material de relleno, haciéndolo más económico (De Guzman Sanchez, 2001).

Además, la perfecta combinación brinda la consistencia y aportan a la resistencia del concreto, los agregados más utilizados son el fino y el grueso que son materiales que se encuentran en cada región siendo explotados de canteras.

#### **5.1.1.3 Agua**

La mayor característica y función del agua para que estos cementos sean hidráulicos es que estos tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, de tal manera que el agua como material dentro del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento (De Guzman Sanchez, 2001).

A su vez el agua es uno de los elementos que ayuda a la manejabilidad y que las mezclas de concreto puedan pasar de una forma heterogénea a una homogénea.

#### **5.1.1.4 Aditivos**

Los aditivos y adición son conceptos diferentes ya que los aditivos son productos que se utilizan con el objeto de modificar las propiedades del concreto o mortero, ya sea en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido, para hacerlo más adecuado según el trabajo o exigencia dada y para que cumpla los requisitos y especificaciones particulares de cada tipo de estructura. Las características logradas mediante el uso de aditivos, que en muchos casos no se pueden lograr por otros métodos o en forma tan económica (Silva, 360 en concreto, 2019).

#### **5.1.2 Fibras utilizadas para fabricación de concreto**

Las fibras siempre estuvieron presentes en materiales que tuvieron usos estructurales similares al concreto como el adobe, la tapia pisada y los morteros de cal entre otros.

Las fibras vegetales son de uso obligado en la tapia pisada y el adobe debido a que les ayudan a asumir esfuerzos de tensión y le confieren así un mayor monolitismo (no fisuración) a los elementos.

El uso de las fibras naturales como un componente más en materiales de relleno o aglomerantes, no es así nuevo y se remonta varios siglos atrás. En concreto existen referencias tempranas de experimentación con un refuerzo discontinuo (clavos, segmentos de cable, ganchos) que se remontan a 1910. Probablemente el uso más extendido de las fibras como un componente más en materiales aglomerantes haya sido su uso en elementos como tejas o prefabricados de asbesto-cemento (SIKA, 2019).

En el mundo existes diferentes fabricantes y empresas que se dedican a la red de distribución de estos materiales que son de diferentes materiales como se describen a continuación.

➤ **Fibras sintéticas**

Las fibras sintéticas son las que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. Así como podemos analizar la Figura 4 que es el resultado final de un tipo de fibra sintética.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción plástica y, consecuentemente, la fisuración; además pueden ayudar al concreto después que se fisura. Se producen como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar en longitudes específicas o como filmes y cintas. Estas fibras se componen de finas fibrillas de sección transversal rectangular (Silva, 360 en concreto, 2018).



*Figura 2.* Fibra sintética Toxement. Fuente: (Toxement, 2019)

➤ **Fibras metálicas**

Las fibras de acero como se pueden observar en la Figura 2, son pequeños pedazos discontinuos de acero con un aspecto o esbeltez (relación entre longitud y diámetro) que varía entre 20 y 100 y con muchas secciones transversales. Algunas fibras de acero tienen extremos conformados para mejorar la resistencia al arrancamiento de la matriz a base de cemento. Presentan módulo de elasticidad relativamente alto y se puede aumentar su adherencia a unión con la matriz de cemento a través del anclaje mecánico o de la rugosidad superficial. Las fibras de acero se usan comúnmente en pavimentos de aeropuertos y en las capas de revestimiento de las pistas. También se usan en los tableros de puentes, pisos industriales y pavimentos de autopistas (Silva, 360 en concreto, 2018).



*Figura 3. Concreto con fibras metálicas. Fuente: (SIKA, 2019)*

➤ **Fibras de vidrio**

Los materiales compuestos generados por las fibras de vidrio son conocidos con el nombre de GRC (Glass Fiber Reinforced Cement), su matriz resistente es un mortero de cemento hidráulico armado con fibras de vidrio. Están especialmente diseñadas para ser compatibles con el ambiente alcalino de la matriz del concreto.

Este tipo de fibras aumenta la durabilidad abarcando a su vez revestimientos químicos, formulados para ayudar en el combate de la reagudización inducida por la hidratación y en el uso de una lechada con humo de sílice para rellenar los vacíos entre las fibras, reduciendo la capacidad de infiltración del hidróxido de calcio. La mayor aplicación del concreto reforzado con fibras de vidrio es la producción de paneles de fachada (Silva, 360 en concreto, 2018). Este tipo de fibras vienen en presentaciones de bolsa con un contenido de 500 gr como se puede ver en la Figura 3.



Figura 4. Fibra de vidrio marca Sika. Fuente: (SIKA, 2018)

### ➤ Fibras naturales



Las fibras naturales se han usado como una forma de refuerzo desde mucho tiempo antes de la llegada de la armadura convencional de concreto. Los ladrillos de barro reforzados con paja y morteros reforzados con crin de caballo son unos pocos ejemplos de cómo las fibras naturales se usaron como una forma de refuerzo. Muchos materiales de refuerzo natural se pueden obtener con bajos niveles de costos de energía, usando la mano de obra y la pericia disponibles en la región. Estas fibras se usan en la producción de concretos con bajo contenido de fibras (Silva, 360 en concreto, 2018).

#### ➤ **Macrofibras**

Generalmente son de materiales como acero, vidrio, materiales sintéticos o naturales (fique y otros), los cuales se utilizan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y orientado en cualquier dirección. Las fibras actúan como malla electrosoldada y varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del **concreto** y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento. Entre los beneficios del uso de concreto reforzado con fibras -CRF-se encuentran el incremento de la resistencia al impacto y a la fatiga. Su diámetro oscila entre los 0,25 mm y 1,5 mm con longitudes variables entre 13 mm y 70 mm (SIKA, 2019).



Figura 5. Macrofibras metálicas, sintéticas y de vidrio. Fuente: (SIKA, 2019)

#### ➤ **Microfibras**

Normalmente son fibras de plástico, polipropileno, polietileno nylon, que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y previenen la formación de fisuras durante la construcción este tipo de fibras tienen apariencias como la que se puede observar en la Figura 6. Las fibras multifilamento permiten obtener mejores resultados y sus longitudes oscilan entre los 12 y los 75 mm y se dosifican en el concreto entre  $0,6 \text{ kg/m}^3$  y  $1 \text{ kg/m}^3$  (CONCRETO, s.f.).



*Figura 6.* Microfibras sintéticas. Fuente: (SIKA, 2019)

## 5.2 Estado del arte

En este apartado se presentan algunas investigaciones relacionadas a la temática central de este estudio, para así tener claridad sobre la situación del conocimiento en el que se encuentra el objeto de estudio.

La investigación de Kim, Yi, Kim, Kim, & Song (2009) se centró en verificar la capacidad de rendimiento que proporciona la incorporación de fibras PET en el diseño de los concretos, mediante la comparación de concretos que tienen incorporado fibras comerciales de polipropileno en porcentajes de volumen del 0.5% 0.75% y 1%. Los investigadores realizaron pruebas apropiadas para medir las propiedades del material como la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la tensión de contracción por secado restringido. Para la mezcla de concreto utilizaron cemento tipo Portland con una densidad de  $3.15 \text{ g/cm}^3$  con una relación agua cemento de 0.41, el tamaño máximo del agregado grueso que utilizaron fue de 25mm y emplearon arena de río como agregado fino. Las fibras de PET recicladas fueron revestidas con polipropileno injertado con anhídrido maleico para mejorar la adherencia, luego de revestir la superficie de las láminas PET recicladas, se cortaron en dimensiones de 1.3 mm x 50 mm. Y para las fibras de polipropileno utilizaron una marca comercial con fibras de dimensiones de 0.9 mm x 50 mm y de tipo rizada. Para las pruebas de compresión y modulo elástico ensayaron cilindros de concreto de 100 x 200 mm a una edad de 28 días, y para pruebas de flexión ensayaron vigas de concreto reforzado con 28 días de edad y dimensiones de 2000 x 200 x 300 mm con barras de 13 mm de diámetro y estribos de 10mm de diámetro con 150 mm de separación. A partir de los ensayos realizados en esta investigación, el concreto reforzado con fibras PET reciclada mostró una pequeña disminución en su resistencia a la compresión a medida que el porcentaje de fibra aumentaba, las muestras con fibras PET y PP (Polipropileno) presentaron una disminución del 1-

9 % y 1-10 % respectivamente, en comparación con las muestras sin refuerzo de fibra. Del mismo modo, el concreto reforzado con fibras PET y PP presentó mayor ductilidad y carga final en los ensayos de vigas, en este caso observaron que la ductilidad y la capacidad de carga aumentaron en un máximo de 1000 % y 30 % respectivamente, al compararlas con las muestras sin refuerzo de fibra. Además, la deflexión máxima en el tramo medio de las vigas fue de hasta 400% más grande. Las muestras de concreto con fibra PET reciclada mostró índices de ductilidad relativos de 7-10 veces mayores que muestras sin refuerzo de fibra, sin embargo, los índices de ductilidad relativos disminuían a medida que aumentaba el porcentaje de volumen de fibra a partir de 0.5%.

La investigación de Pereira, De Oliveira junior, & Fineza (2017) tuvo como objeto central encontrar la relación optima entre la longitud de la fibra PET y porcentaje en volumen de la mezcla, para incrementar la eficiencia de propiedades como la resistencia a la compresión, a la tensión y a la flexión del concreto. Por medio de 10 ensayos cambiaron las variables de longitud y porcentaje de volumen con valores para las longitudes de las fibras de 7.9, 10, 15, 20 y 22 mm con un ancho estándar de 3 mm, y valores de porcentajes entre 0.05 % y 0.34 %. Utilizaron un concreto para ensayos de 32 MPa a edad de 28 días, elaborado con cemento Portland tipo 2, agregado fino con un módulo de finura de 2.66 y agregado grueso con un tamaño máximo de 19 mm. Los especímenes para los ensayos tenían dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Después de los ensayos, determinaron que para la resistencia a la compresión la longitud de la fibra no influye significativamente en el aumento de la eficiencia a la compresión, sin embargo, longitudes alrededor de 22 mm podrían proporcionar valores de resistencia a la compresión cercanos al punto óptimo. Por otra parte, el valor del porcentaje de fibra logra maximizar la resistencia a la compresión cuando se encuentra en un valor de 0.06% y disminuye

a medida que aumenta el valor del porcentaje de fibra en la mezcla. Para la resistencia a la tensión se observó que ambas variables son influyentes, a medida que el valor de la longitud de la fibra aumentaba, se notaba un incremento en el valor de la resistencia a la tensión, para los valores entre 7.93 y 11.5 los valores de la resistencia encontrados fueron inferiores al 6.2 %, entonces para lograr un aumento en la eficiencia en la resistencia a la tracción se deben usar fibras de un tamaño mínimo de 11.5 mm. Al final concluyeron que valores de 22 mm y 0.06 % para longitud y porcentaje de fibra, respectivamente, permiten los valores más altos posibles para la resistencia a la compresión y a la tensión.

La investigación de Foti (2010) se enfocó en analizar la posibilidad de usar fibras de botellas PET recicladas con el fin de aumentar la ductilidad del concreto. Utilizaron fibras con longitudes de 32 mm y un ancho de 2 mm y fibras circulares con un diámetro entre 30 y 50 mm y un ancho variable alrededor de los 5 mm. Los especímenes fueron de dimensiones de 100 x 100 x 400 mm con un concreto elaborado con cemento portland tipo 2 con un porcentaje de 0.26%, 0.5% y 0.75% del volumen de concreto de fibras PET recicladas. Luego de los ensayos se observó que en concretos sin fibras después de presentarse la primera grieta por flexión, el espécimen se quiebra repentinamente tal y como conocemos el comportamiento normal del concreto ante la flexión. Por otro lado, en los especímenes reforzados con fibras PET la falla progresa continuamente sin llegar a un colapso del material ya que al momento que el concreto cede, la carga que soportaba previamente se transmitía a las fibras. Las muestras reforzadas con fibras laminares mostraron un aumento en la tenacidad, ya que se presenta un proceso de grietas más lento lo que evita que el espécimen colapse de manera repentina. Sin embargo, las muestras reforzadas con fibras en forma de “O” o circulares mostraron un aumento mucho más significativo en la tenacidad, esto se debe por la forma particular de la fibra ya que tiene una

relación de aspecto más alta. La forma cerrada de la fibra produce una mejor unión dentro del concreto a ambos lados de la grieta y determina una mayor resistencia al deslizamiento en comparación con las fibras laminares. Tras el análisis que realizaron, determinaron que el mejor comportamiento de las fibras en el concreto se da con las fibras circulares, además de que una mayor dosificación de las fibras aumenta la ductilidad del concreto. Al final demostraron que la adición de una cierta cantidad de fibras de botellas PET recicladas puede llegar a tener una gran influencia en el comportamiento posterior al agrietamiento de los elementos de concreto. Ambos tipos de fibra mejoran la tenacidad de los especímenes, y en donde se evidencia mejor es en las fibras circulares, debido a que su forma ayuda a unir el concreto en gran medida en las secciones agrietadas.

El objetivo de la investigación de Foti & Paparella (2014) consistió en evaluar la resistencia al impacto de losas de concreto reforzadas con tiras largas de fibra PET y comparar el comportamiento con respecto a las losas de concreto no reforzado. Para esto, prepararon 4 losas de dimensiones de 80 x 80 x 5,8 cm, dos losas de concreto no reforzado y 2 losas de concreto reforzado con tiras de fibra PET. Las tiras fueron cortadas de 5 cm de ancho y con una longitud total de 77 cm de largo, fueron dispuestas en forma de cuadrícula con un paso de 3 cm entre tiras. La carga de impacto consistió en un elemento cilíndrico de acero de 14 cm de diámetro y 24 cm de altura que se colocó en el centro de la placa. Sobre este cilindro se dejó caer otro cilindro metálico de 290 N desde una altura fija de 1,0 m. Luego de las pruebas que realizaron observaron que el mecanismo de fisuración fue similar para todos los ensayos, las losas de concreto no reforzado sufrieron una rotura total y casi instantánea, mientras que las reforzadas con fibra PET no alcanzaron la rotura debido a la ductilidad que ofrecía la disposición de la rejilla con tiras de fibra PET, además el comportamiento tiempo-fuerza es diferente debido a la

capacidad de disipación de energía del refuerzo. Justo después del impacto en las losas reforzadas con fibras PET no se produjo ningún fallo, seguido de una disminución de la deformación para luego un aumento con una tendencia fluctuante indicando que la losa continúa resistiendo y capaz de mantener su integridad estructural, exceptuando las fracturas superficiales generadas por el impacto.

El estudio de Rahmani (2013) se enfocó en los efectos de la sustitución del 5%, 10% y 15% de arena por partículas PET en la mezcla de concreto. Para esto fabricaron probetas cilíndricas con diferentes proporciones de agua/cemento, las partículas de PET las produjeron mediante la molienda de botellas de PET desechadas con un tamaño máximo de 7 mm y se utilizan como agregado fino en el concreto. Para determinar la resistencia a la compresión ensayaron cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, con un tiempo de curado de 28 días y para la resistencia a la flexión ensayaron vigas de 50 x 10 x 10 cm. Después de los ensayos que realizaron determinaron que la sustitución del 5% del agregado fino con partículas de PET produjo la resistencia a la compresión óptima, para el 5% de contenido de PET obtuvieron el 8.86% y 11.97% de aumento en la resistencia para relaciones a/c de 42% y 54% y a medida que aumentaba el porcentaje de fibras PET se redujeron las resistencias. Además, los resultados demostraron que el concreto con el remplazo del 10% de agregado fino por partículas de PET tienen la misma resistencia que las probetas de control sin partículas de PET, pero con un módulo de elasticidad inferior. Por último, determinaron que aumentar el porcentaje de partículas PET hasta un 15% reducía la resistencia a la tracción en un 15,9% y un 18,06%, y reducía el módulo de elasticidad en un 20% y un 23% para relaciones de a/c del 42% y 54%, respectivamente.

En el artículo de Mohammed (2017) se recopilaron y analizaron todo tipo de datos relacionados sobre las propiedades mecánicas del concreto que contenga residuos de PET, para desarrollar ecuaciones para calcular el módulo de elasticidad, de rotura y las resistencias a la tracción por flexión. En total, alcanzaron a recopilar un total de 79 datos para el módulo elástico 155 datos para la resistencia a la tracción por división y 87 datos para la resistencia a la tracción por flexión. Estas ecuaciones se obtuvieron mediante un análisis de regresión basado en todos los datos que recopilaron, con el fin de obtener ecuaciones precisas para las variables. Descubrieron que las propiedades mecánicas del módulo elástico, resistencia a la tracción por división y la resistencia a la tracción por flexión dependen de los parámetros independientes de la resistencia a la compresión del concreto, el volumen de partículas de PET, la densidad del concreto y las propiedades de las partículas PET. Entre estos, el parámetro más fuerte fue el de la resistencia a la compresión, por lo cual, fue el de más relevancia a la hora del análisis de regresión sobre los datos de prueba. Las ecuaciones que propusieron tienen un rango para concretos que contengan partículas de PET con proporciones del 0,4% al 75% como reemplazo de arena. Las ecuaciones lineales fueron más precisas para el módulo elástico y la resistencia a la tracción por división, mientras que las ecuaciones en potencia daban como resultado mejor precisión para la resistencia a la tracción por flexión.

En la investigación de Borg (2016) estudiaron a fondo el comportamiento del concreto con fibras producidas a partir de residuos plásticos PET, consistió en la identificación del comportamiento mecánico de las fibras hasta la evaluación de su unión con la matriz y de las propiedades de edad temprana y estado endurecido del concreto reforzado con fibra de PET. Evaluaron diferentes tipos de fibras PET trituradas, rectas y deformadas, con diferentes longitudes de fibra de 30 mm y 50 mm, con porcentajes variables de adición en el concreto entre



0,5% y 1,5%. Elaboraron especímenes cúbicos de 150 mm para los ensayos de compresión con edades de 3, 7 y 28 días. Luego de los resultados obtuvieron que la adición de fibras de PET conduce a una reducción de entre 0,5% y un 8,5% en la resistencia a la compresión comparado con los especímenes sin adición de fibras, y a su vez, una mayor disminución ocurría al aumentar las fracciones de volumen de la fibra. Los especímenes que contenían fibras más cortas se comportaban ligeramente mejor en comparación con los que contenían fibras más largas. Los resultados de las pruebas de flexión mostraron que los concretos que contenían fibras alcanzaron un pico de carga mayor que los concretos de control. Todos los especímenes ensayados tuvieron un comportamiento elástico lineal similar hasta la rotura, en el que observaron una pérdida repentina de resistencia. La resistencia residual posterior a la fisuración dependía de la fracción de volumen de fibra, los volúmenes de fibra más altos proporcionaban la mejor resistencia residual. Las fibras deformadas influyeron en mejores resistencias residuales debido a una mejor unión. Por último, las mezclas de concreto que contienen las fibras más cortas lograron una carga máxima ligeramente menor en comparación con las otras mezclas.

La investigación de Fraternali (2014) se trató de un estudio sobre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra PET y su durabilidad en un entorno de agua de mar agresivo. Para los especímenes de concreto se utilizó un cemento tipo Portland con una relación agua/cemento de 0,38 con dos tipos de fibra PET, con diámetro de 1.10 mm y 40 mm de longitud de tipo liso, y la otra con un diámetro de 0,70 mm y 52 mm de longitud de tipo rizada. Los especímenes realizados tenían una dimensión de 150 x 150 x 600 mm, estos se clasificaron en 3 categorías, de control sin refuerzo de fibra y con los dos tipos de fibras que elaboraron ambos con al 1% del contenido en volumen. Después de un curado de 28 días, se realizó un curado adicional a especímenes seleccionados con agua de mar en sumersión por 6 y 12 meses. Luego

de realizar los ensayos, los resultados demostraron que los especímenes curados al aire y reforzados con amos tipos de fibra PET muestran un aumento en términos de la capacidad de absorción de energía. Por otro lado, indicaron que las fibras de tipo liso parecían ser beneficiosas en términos de la resistencia a la compresión y tracción con una relación agua/cemento alto de 0,53. Por el contrario, las fibras de tipo rizado parecían ser adecuadas para mejorar la resistencia a la compresión y la resistencia a la primera fisura de los concretos con una relación agua/cemento baja de 0,38. Con respecto al curado con agua de mar, observaron que la inmersión prolongada de los especímenes analizados llevó a modificaciones mínimas de la resistencia a la compresión y la resistencia a la primera fisura del material, en comparación con la contraparte curada al aire. Además, observaron marcadas reducciones en la capacidad de absorción de energía de los especímenes después de 12 meses de acondicionamiento en el agua de mar, en comparación con los especímenes curados al aire. El deterioro significativo en la tenacidad en las fibras de tipo lisa fue de 52,1% y de 5,5 % con las fibras rizadas.

## **6. Diseño metodológico**

Este proyecto de investigación se ejecutó conforme a las siguientes siete (7) fases:

### **Fase 1: Base teórica**

Esta fase comprenderá todo lo relacionado a la búsqueda de información correspondiente con el tema. Apoyado en diferentes medios para la realización del estado de arte, siendo estos medios: la base de datos de la Universidad de la Costa, trabajos de grados, investigaciones, internet, etc.

### **Fase 2: Recolección y compra de materiales**

Dentro de esta fase se hizo efectiva la recolección de los materiales a utilizar para la elaboración del concreto, estos materiales fueron:

- Agregado grueso.
- Agregado fino.
- Cemento.
- Material reciclado PET el cual procederá a triturar para generar fibras y poder utilizarlo dentro del concreto.

### **Fase 3: Realización de ensayos de caracterización de los materiales**

En esta fase se aplicaron los ensayos correspondientes a cada agregado con base a las normas NTC descrita en la Tabla 1 para análisis de estos y su posterior utilización en el diseño de mezcla.

Tabla 1.

*Normas correspondientes a los ensayos de los materiales*

	ENSAYOS	NORMA
Cemento	Densidad	NTC 221
	Finura (tamices)	NTC 294
	Granulometría	NTC 77
	Módulo de finura	NTC 77
	Masa unitaria suelta	NTC 92
Agregado fino	Masa unitaria compacta	NTC 92
	Densidad aparente	NTC 237
	Absorción	NTC 237
	Humedad natural	NTC 1776
	Granulometría	NTC 77
Agregado grueso	Tamaño máximo	NTC 77
	Tamaño máximo nominal	NTC 77

Masa unitaria suelta	NTC 92
Masa unitaria compacta	NTC 92
Densidad aparente	NTC 176
Absorción	NTC 176
Humedad natural	NTC 1776

Nota: Los ensayos para el cemento fueron tomados de la ficha técnica de Argos. Fuente: Elaboración propia.

#### Fase 4: Diseño de mezcla

Se realizará el diseño de las mezclas del concreto de 3000 PSI con el método ACI 211 con base en los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los materiales. Este diseño tendrá tres variantes, la primera consistirá en un diseño de control sin ningún tipo de refuerzo de fibra, la segunda en un diseño con un refuerzo de fibra comercial ( $1,8 \text{ kg/m}^3$ ) y por último un diseño de mezcla con la inclusión de refuerzo de fibra PET en porcentajes de (0,2 y 0,35 %).

#### Fase 5: Elaboración y fraguado del concreto

Se procedió a elaborar el concreto con los datos obtenidos en el diseño de mezcla fabricando así 3 muestras por cada tipo de probeta y edad de curado para cada una de las variantes del diseño como podemos observar en la Tabla 2:

Tabla 2.

*Cantidad de probetas cilíndricas y viguetas*

Curado	Probetas	Control	Fibra comercial	Porcentajes de fibras PET	
				0,2%	0,35%
4 días	Cilindros 10 X 20	3	3	-	-
	Cilindros 15 X 30	3	3	3	3
	Cilindros 10 X 20	3	3	-	-
7 días	Cilindros 15 X 30	3	3	3	3
	Viguetas	3	3	3	3
28 días	Cilindros 10 X 20	3	3	-	-

Cilindros 15 X 30	3	3	3	3
Viguetas	3	3	3	3
Total, muestras cilíndricas 10 X 20				18
Total, muestras cilíndricas 15 X 30				36
Total, de viguetas				24

---

Fuente: Elaboración propia

Para un total de 78 muestras, siendo 18 cilindros de 10 x 20, 36 cilindros de 15 x 30 y 24 viguetas en total. Después de realizada la fundición se esperará 24 horas para desencofrar y proceder al curado de estos durante los periodos correspondientes para cada tipo de probetas.

### **Fase 6: Realización de los ensayos**

Después de elaborar las probetas del concreto de cada variante se realizarán los ensayos luego finalizar el proceso de curado correspondiente para cada probeta. Los ensayos a realizar en encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3.

*Ensayos al concreto en estado fresco y endurecido*

Ensayos	Norma
Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto	NTC-396
Ensayo de resistencia a compresión de especímenes cilindros de concreto	NTC-673
Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)	NTC-2871

---

Fuente: Elaboración propia

### **Fase 7: Análisis de resultados y redacción de conclusiones**

Con respecto a los datos obtenidos en los ensayos se analizaron y compararon los resultados obtenidos para obtener así las conclusiones.

## 7. Programa experimental

### 7.1 Selección de materiales

Al momento de realizar la selección de materiales no se contempló ningún requerimiento especial para los mismo, por lo tanto, se seleccionó materiales comunes utilizados en cualquier concreto. Por motivos de transporte y accesibilidad, los materiales se tomaron de una ferretería cercana a la universidad.

En el caso del agregado reciclado PET que se utilizó como adición al concreto, se seleccionaron envases plásticos de diferentes tipos como de bebidas y desinfectantes obtenidos del proceso de reciclado. Los materiales seleccionados y utilizados para la fabricación de las muestras de concreto se encuentran descritos en la Tabla 4.

Tabla 4.

*Características generales de los materiales a adicionar al concreto.*

Materiales	Procedencia	Observaciones
Cemento de uso general	Marca Argos	Presentación 25 kg
Agregado grueso natural	Agregado suministrado de ferretería Pradito procedente de Arroyo de Piedra	Tamaño del agregado 3/4"
Agregado fino natural	Agregado suministrado de ferretería Pradito procedente de Santo Tomas	-
Fibras sintéticas	Marca Toxement	Macro fibra sintética TUF STRAND MAXTEN
Fibras PET recicladas	Envases plásticos reciclados	Cortadas de forma manual

Fuente: Elaboración propia.

## **7.2 Procesamiento de fibras PET.**

El uso de fibras en el concreto es un proceso el cual actualmente está tomando fuerza en el campo de la construcción, pero el uso de fibras recicladas PET está orientado a la investigación. Además, cabe resaltar que son pocas las personas que reciclan los envases plásticos, y muchos de estos envases pueden mezclarse con otros elementos no reciclables o terminar en zonas marítimas.

Para obtener los envases plásticos se realizó una recolección manual con la ayuda de negocios de comidas los cuales nos suministraron los envases de productos que se consumían.

El proceso manual llevado a cabo con ayuda de terceros voluntarios para poder obtener el agregado reciclado consistía en los siguientes pasos:

### **7.2.1 Recolección y transporte de material PET.**

En esta etapa se estableció contacto con dos negocios de comidas ubicados en Puerto Colombia quienes se encargaron de reciclar todos los envases PET de diferentes referencias ya que en ciertas zonas del país todavía no es utilizada la práctica de reciclaje por parte de las personas.

Esta recolección se llevó a cabo de manera informal, es decir no se tramitó ninguna clase de permiso especial, y los dueños de los sitios se comunicaban para proceder a la recolección. La cantidad recolectada de material fue de 112 envases de diferentes tipos para un peso de 5.8 kg.

### **7.2.2 Clasificación inicial**

A pesar de que los envases de plástico recolectados son producto de la recolección se efectúa una clasificación inicial con el fin de que los envases estén limpios o sucios de residuos como gaseosas y aceites, si se encontraban sucios se procedía a la limpieza de forma manual y

posteriormente al secado de los envases que por lo general en su mayoría traían residuos en su interior lo que ocasionaría posibles alteraciones en el resultado de las mezclas.

### **7.2.3 Elaboración de fibras PET.**

En este paso después de la limpieza y secado de los envases se procedió a la elaboración de las fibras las cuales se realizaron en dos etapas que fueron:

#### **7.2.3.1 Cortado del fondo y el área de la tapa.**

En esta etapa se cortó tanto el área del fondo y tapa del envase con el fin de dejar solo el cuerpo de las botellas ya que estos pedazos son muy rígidos y difícil de volverlas tiras quedando como se puede observar en la Figura 7.

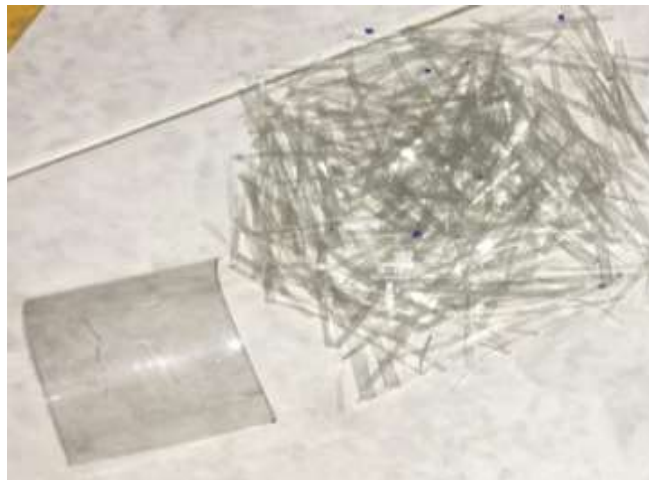


*Figura 7.* Corte del área del fondo y tapa del envase. Fuente: Elaboración propia.

#### **7.2.3.2 Cortado en tiras de fibra**

En esta etapa se cortó de forma manual con una tijera los envases en bloques de 50 mm de ancho como se puede ver en la Figura 8, ya con el largo definido se continua a cortar las fibras en un grosor de aproximadamente de 2 mm.





*Figura 8.* Resultado final de las fibras. Fuente: Elaboración propia.

### **7.3 Caracterización de materiales**

En esta sección se describen los materiales a utilizar en la elaboración de la mezcla de forma detallada y se nombran los ensayos pertinentes que permiten identificar las propiedades de los materiales.

#### **7.3.1 Características generales**

##### **7.3.1.1 Cemento Portland**

El cemento utilizado para la elaboración del concreto fue cemento portland de uso general de la marca Argos. Según su ficha técnica este cemento está diseñado para brindar amplias posibilidades de aplicación y por eso, es adecuado para proyectos de pequeñas obras, remodelaciones y reparaciones. Se puede utilizar para fabricar morteros, lechadas y concretos para la construcción en general.

Las especificaciones del cemento gris uso general cumplen con los valores de la Norma Técnica Colombiana NTC 121:2014 (Tipo UG). Se puede aplicar en:

- Todo tipo de elementos de concreto que no requieran características especiales.

- Reparaciones, remodelaciones, pequeñas obras y diversas aplicaciones domésticas.
- Elaboración de morteros para pisos, nivelaciones, lechadas y emboquillados.
- Producción de elementos prefabricados de pequeño y mediano formato.
- Preparación de morteros para mampostería, pega de cerámicos, enchapes, acabados, recubrimientos y morteros de relleno.

Según su ficha técnica, este tipo de cemento cuenta además con las siguientes especificaciones técnicas las cuales se describen en la Tabla 5.

Tabla 5

*Especificaciones técnicas del cemento de uso general Argos*

Parámetros físicos		Normas de ensayo	NTC 121 TIPO UG
Finura	Blaine, min, (cm <sup>2</sup> /gr)	NTC 33	A
	Retenido Tamiz 45 mm (%)	NTC 294	A
Cambio de longitud por autoclave, expansión, máx. (%)		NTC 107	0,8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat	No menos de, minutos	NTC 118	45
	no más de, minutos	NTC 118	420
Contenido de aire en volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barra de mortero 14 días (%).		NTC 4927	0,02
RESISTENCIA MINIMA A LA COMPRESION (MPa)			
3 días		NTC 220	8
7 días		NTC 220	15
28 días		NTC 220	24

Nota: La tabla descrita son los parámetros físicos del cemento de uso general de argos con el cual se tienen en cuenta para la calidad del cemento. Adaptado de Argos, 2019

### 7.3.1.2 Agregado grueso natural.

El agregado grueso natural utilizado como se puede observar en la Figura 9 corresponde al distribuido por la ferretería el Pradito de la ciudad de Barranquilla el cual fue el encargado del

suministro de todo el agregado a utilizar, por tal motivo en la Tabla 6 descrita a continuación se puede observar las características generales del agregado grueso.

Tabla 6.

*Características generales del agregado grueso natural*

Ítems	Descripción
Origen	Arroyo de piedra
Proporcionado por	Ferretería el Pradito
Denominación popular	Gravilla
Apariencia	Limpia y superficialmente seca
Presentación	Saco de 30 a 35 kg
Fuente: Elaboración Propia.	



*Figura 9. Agregado grueso natural Fuente: Elaboración propia.*

### 7.3.1.3 Agregado fino natural.

El agregado fino es procedente de la cantera de Santo Tomas y distribuido por la gran parte de las ferreterías. Este tipo de agregado fino por lo general tiende a ser de grano un poco grueso de lo normal como se puede visualizar en la Figura 10, por lo que se esperaría que el módulo de finura resultara un valor alto en consideración con el promedio. En la Tabla 7 descrita a continuación se puede observar las características generales del agregado fino.

Tabla 7.

*Características generales del agregado fino natural*

Ítems	Descripción
Origen	Cantera de Santo Tomas
Proporcionado por	Ferretería el Pradito
Condición de humedad superficial	Seca
Apariencia	Arena limpia, bien gradada
Presentación	Sacos entre 40 a 50 kg

Nota: Especificaciones generales y lugar de procedencia del agregado fino.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 10. Saco de agregado fino natural. Fuente: Elaboración propia.

#### 7.3.1.4 Fibra sintética.

Las fibras utilizadas en el concreto hacen parte de la empresa Toxement las cuales fueron suministradas por la compra de un paquete en el almacén Homecenter, estas fibras suelen venir de diferentes materiales y dimensiones. En este estudio se utilizaron las macro fibras sintéticas Tuf strand maxten.

Sus diferentes usos se pueden ejecutar en concretos para: Pisos y placas de concretos, andenes, sobre placas y sistemas placa fácil.

Este tipo de fibras poseen unas especificaciones técnicas importantes las cuales se pueden analizar en la Tabla 8 descrita a continuación.

Tabla 8.

*Especificaciones técnicas las fibras sintéticas Toxement*

Ítems	Descripción
Color	Gris
Material	100% mezcla virgen de copolímeros
Gravedad especifica	0,91
Dosis típica	1,8 a 3,7 kg/m <sup>3</sup>
Longitud	38 mm
Relación de aspecto	39/79
Resistencia a tensión	84,94 ksi
Punto de fusión	180°C
Conductividad eléctrica y térmica	Despreciable
Resistencia a álcali y ácidos	Excelente

Nota: La tabla presenta todas las especificaciones técnicas de apariencia y resistencia de las macrofibras marca Toxement que se utilizaron en las mezclas de concreto. Adaptado de (Toxement, 2019)

Este tipo de fibras que se utilizaron en el desarrollo experimental vienen en presentaciones como se pueden ver en la siguiente Figura 11, la cual es una bolsa con 7 bolsas internas para las dosificaciones de concreto a utilizar por cantidad de bolsa de cemento.



*Figura 11. Macro fibra Toxement TUF STRAND MAXTEN Fuente: (Toxement, 2019)*

#### **7.3.1.5 Fibra reciclada PET.**

Las fibras recicladas PET como se pueden observar en la Figura 12, se obtuvieron del proceso que se les realizaron a los envases plásticos obtenidos de diferentes zonas de reciclado del área de Puerto Colombia. Las características específicas de este tipo de residuo son según las



especificaciones técnicas de los envases de gaseosas utilizados, además en la Tabla 9 se describen las características de apariencia de la fibra a adicionar en el concreto.

Tabla 9.

*Características generales de las fibras PET*

Ítems	Descripción
Origen	Envases plásticos
Proporcionada por	Reciclados de productos
Largo x ancho	50 x 2 mm
Apariencia	Plástica de diferentes colores rectangular

Nota: características generales de las fibras PET a adicionar al concreto ecológico. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 12.* Fibras recicladas PET. Fuente: Elaboración propia.

### **7.3.2 Ensayos a los materiales**

#### **7.3.2.1 Humedad de los agregados**

El ensayo de humedad del agregado fino y grueso se realizó teniendo en cuenta la NTC-1776. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.

El objetivo principal de esta norma es determinar el porcentaje de humedad evaporable de las muestras de agregado sometida a secado en la que el procedimiento que se ejecutó en este ensayo fue el siguiente:

- Primero que se debe realizar es obtener las masas de las taras a utilizar.
- Se vierten los agregados en las taras y se toman sus masas para así introducirlas luego en un horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por una duración de 24hr.
- Luego de transcurrido las 24hr se extraen del horno los agregados para así dejarlos reposar unas tres horas para poder obtener las masas del material seco.

Después de realizar el procedimiento descrito anterior mente se procede a realizar los cálculos pertinentes en la que se utiliza la siguiente formula:

$$\%W = 100 * (H - S) / S$$

Donde:

W= Contenido de humedad de la muestra en porcentaje.

H= Masa inicial de la muestra, en gr.

S= Masa de la muestra seca, en gr.



A continuación, en la Tabla 10 se describen los datos y el resultado del ensayo de humedad practicado al agregado grueso realizado en las instalaciones de la Universidad de la Costa.

Tabla 10.

*Datos y resultado de ensayo de humedad agregado grueso natural*

Descripción	Datos	Unidad
Masa de la tara	1,5	kg
Masa tara + muestra húmeda	4,608	kg
Masa tara + muestra seca	4,56	kg
Humedad	1,569	%

Fuente: Elaboración propia.

Así como se le practicó al agregado grueso también al agregado fino se le tomaron todos los datos necesarios los cuales se encuentran descritos en la Tabla 11.

Tabla 11.

*Datos y resultado de ensayo de humedad agregado fino natural*

Descripción	Datos	Unidad
Masa de la tara	1,5	kg
Masa tara + muestra húmeda	2,022	kg
Masa tara + muestra seca	2,017	kg
Humedad	0,967	%

Fuente: Elaboración propia

### **7.3.2.2 Granulometría de los agregados**

El ensayo de granulometría del agregado fino y grueso se realizó teniendo en cuenta la NTC 77. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.

El objetivo de este ensayo es la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos a través del proceso de tamizado. El procedimiento que se realizó para este ensayo fue el siguiente:

- Se procede a lavar la muestra tanto de agregado fino y grueso para desprender los finos que se encuentran adheridos alrededor de las partículas más grandes.
- Después de su lavado se procede a introducir la muestra en el horno por 24hr para su secado.
- Después de las 24hr se procede a extraer la muestra del horno para dejarla reposar y así poder pesar las cantidades de muestra a utilizar en donde para nuestro ensayo según la tabla 14 para el agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ " se necesitan mínimo 5000 gr y para el agregado fino la norma específica que se pueden utilizar mínimo 300 gr de los cuales se utilizaron 500 gr.

Tabla 12.

*Masa mínima para ensayo de granulometría del agregado grueso.*

Tamaño máximo nominal de aberturas cuadradas (mm)	Masa mínima de muestra de ensayo (kg)
9,5	1
12,5	2
19	5
25	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Nota: Masas mínimas de muestra a utilizar para el ensayo de granulometría del agregado grueso.  
Adaptada de (NTC-77, 1994)

- Luego se procede a tamizar las muestras por la serie de tamices descrita en la Tabla 15 tanto para agregados grueso y agregado fino.

Tabla 13.

*Números de tamices para ensayo de granulometría.*

Tamices para agregado fino		Tamices para agregado grueso	
Ø	(mm)	Ø	(mm)
Nº 4	4,76	1"	25,4
Nº 10	2	3/4"	19,05
Nº 16	1,19	1/2"	12,7
Nº 20	0,84	3/8"	9,525
Nº 40	0,426	1/4"	6,35
Nº 50	0,297	#4	4,76
Nº 60	0,25	-	-
Nº 80	0,177	-	-
Nº 100	0,149	-	-
Nº 200	0,074	-	-
Fondo	0,01	-	-

Nota: Serie de tamices existentes adoptados por la normativa para la realización del ensayo de granulometría del agregado grueso y fino.  
Adaptada de (NTC-77, 1994)

- Después de realizar el tamizado de la muestra se procede a realizar la curva granulométrica y así también hallar el módulo de finesa del agregado fino.

**Agregado grueso natural.**

La masa utilizada para el ensayo granulométrico fue de 5110 gr, la cual se encuentra dentro del rango de muestra de ensayo establecido por la norma NTC 77. Este material es uno de los más utilizado para la construcción y para lo cual según la norma mencionada anteriormente se realizó el procedimiento obteniendo los siguientes resultados descritos en la Tabla 14

Tabla 14.

*Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla*

Tamices		Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que Pasa
Ø	(mm)				
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19,05	2724	53,31	53,31	46,69
1/2"	12,7	1863	36,46	89,77	10,23
3/8"	9,525	413	8,08	97,85	2,15
#4		108	2,11	99,96	0,04
Peso inicial		5110			

Fuente: Elaboración propia.

De la granulometría realizada al agregado grueso en la Tabla 16 se puede observar en la Tabla 15 el tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 15.

*TM Y TMN obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla*

	Mm	Tamiz
Tamaño máximo (TM)	25	1 in
Tamaño máximo nominal (TMN)	25	1 in

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, como se mencionó anteriormente, en ensayo granulométrico permitió obtener la siguiente curva granulométrica que se graficó en la Figura 13, la cual fue comparada con los valores máximo y mínimos permitidos por la ASTM C 33-16 en la curva No 67 Tabla 2 de la misma.

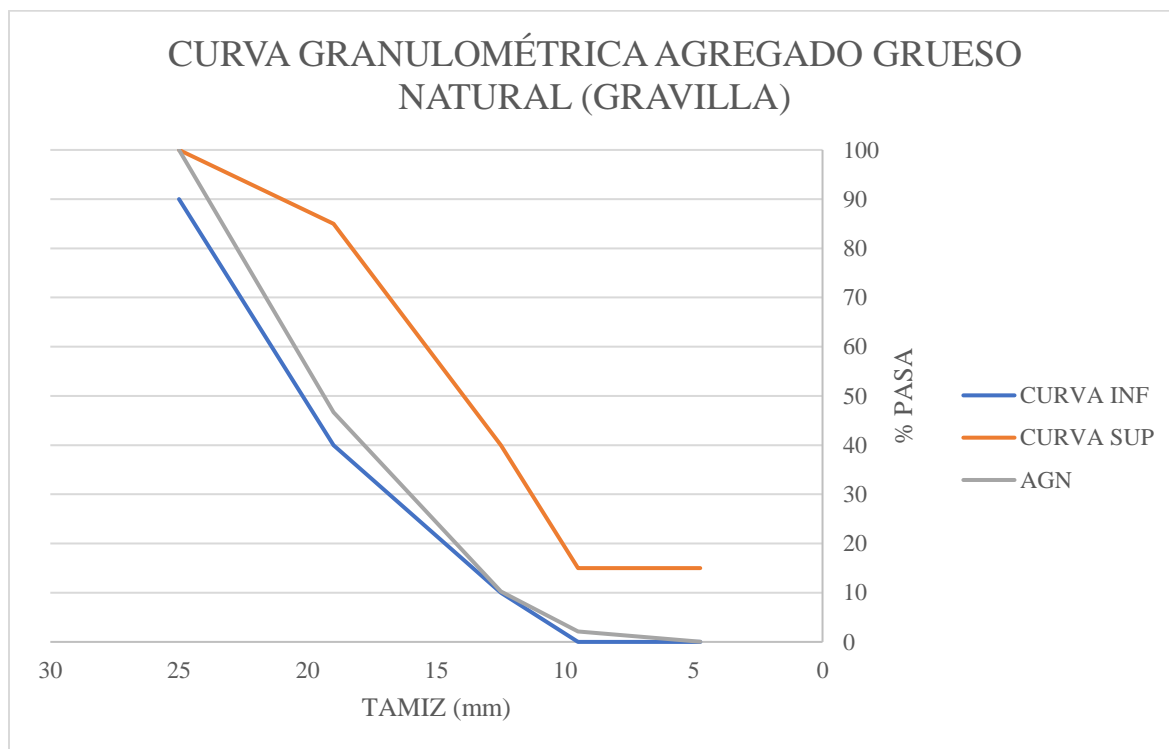


Figura 13. Curva granulométrica del agregado grueso natural (Gravilla). Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico puede apreciarse que la granulometría obtenida no cumple con lo establecido por la norma con base a los límites se encuentra por fuera, de igual manera se decidió a realizar la investigación con este material debido a que es el más comúnmente utilizado en la región Caribe.

#### **Agregado fino natural.**

Para la caracterización granulométrica del agregado fino se utilizó la misma norma que para el agregado grueso, los resultados obtenidos en el ensayo para una masa inicial de 500 gr se muestran a continuación en la Tabla 16:

Tabla 16.

*Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado fino (Arena)*

Tamices	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
Nº4	4,76	0	0,0	100,0
Nº8	2,36	0	0,0	100,0
Nº 16	1,19	1	0,2	99,8
Nº 30	0,85	62	12,7	87,1
Nº 50	0,297	308	62,9	24,3
Nº 100	0,149	74	15,1	9,2
Nº 200	0,074	43	8,8	0,4
Fondo	2	0,4	100,0	0,0
PESO INICIAL	490			

Nota: Resultados obtenido de la granulometría del agregado fino el cual se le realizo al agregado suministrado por la ferretería pradito. Fuente: Elaboración propia.

Un parámetro importante de agregado fino que surge de este ensayo es el módulo de finura de la arena como esta descrito en la Tabla 17 el cual se obtiene dividiendo la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices utilizados y posteriormente dividiéndolos entre 100. Cabe aclarar que este ensayo se llevó a cabo con los elementos y tamices convencionales establecidos por la norma.

Tabla 17.

*Módulo de finura (Arena)*

Resultado
1,80

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14 se muestra la curva granulométrica obtenida para el agregado fino (Arena de Santo Tomas).

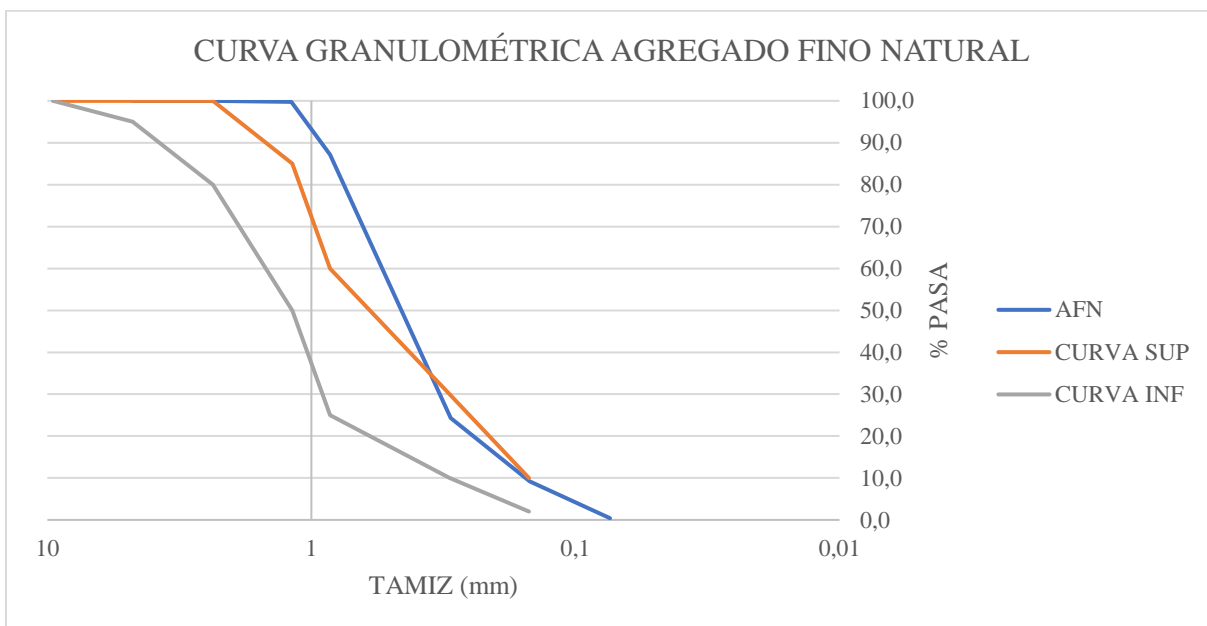


Figura 14. Curva granulométrica agregado fino natural – Arena de Santo Tomas. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico puede apreciarse que la granulometría obtenida no obedece a los límites establecidos en la norma ACI 211.1, de igual manera se decidió a realizar la investigación con este material debido a que es el más comúnmente utilizado en la región Caribe.

### 7.3.2.3 Masa unitaria de los agregados.

El ensayo de masa unitario de los agregados se realizó teniendo en cuenta la NTC 92. La cual describe el método de ensayo para determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados.

El objetivo de esta norma es determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregado fino, grueso o mezclados.

El procedimiento para el ensayo tanto para el agregado grueso y fino fue el siguiente:

- Se determinó el molde dependiendo del tamaño máximo nominal del agregado como se describe en la Tabla 18.

Tabla 18.

*Molde para ensayo de masa unitaria*

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Capacidad del molde	
	m <sup>3</sup>	L
12,5	0,0028	2,8
25	0,0093	9,3
37,5	0,0140	14
75	0,0280	28
112	0,0700	70
150	0,1000	100

Nota: Tamaños y capacidades de molde para ensayo de masa unitaria. Adaptada de (NTC-92, 1995)

- Se tomaron las medidas del molde de la Figura 15, para el molde que utilizamos las dimensiones se denotan en la Tabla 18. Tomar las medidas sirve para tener la cantidad de muestra a utilizar siempre garantizando un porcentaje más ya que pueden tener alteraciones.

Tabla 19.

*Dimensiones del recipiente para ensayo de masa unitaria*

Volumen del molde		
	Diámetro (m)	Altura (m)
Volumen molde	0,155	0,16

Nota: Medidas tomadas al molde a utilizar para el ensayo de masa unitaria tanto compactada como suelta. Fuente: Elaboración propia.





*Figura 15.* Recipiente para ensayo de masa unitaria. Fuente: Elaboración propia.

- Tanto para el agregado fino y grueso se introduce el material en el horno a  $110^{\circ}\text{C}$  para proceder al secado de la muestra.
- Se retira del horno la muestra y se deja enfriar hasta poder manipular la muestra para así proceder con el ensayo.
- Para la masa unitaria suelta de los agregados se vierte el contenido de la tara de una manera y una altura constantes hasta obtener el llenado de la probeta y poder retirar los excedentes, para así luego proceder a pesar la probeta y obtener las masas registradas.
- Para la masa unitaria compactada de los agregados, se escogió el procedimiento por apisonamiento en donde el procedimiento es con una pala introducir el material en tres capas lo más uniformes y por cada capa generar 25 golpes con una varilla de acero lisa,

redonda y recta de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud en donde la primera capa se debe tener como precaución no tocar el fondo con varilla.

- Para finalizar el ensayo se toman las masas registradas compactadas y así proceder a los cálculos a continuación.

Después de realizar el procedimiento descrito anterior mente se procede a realizar los cálculos pertinentes en los que se utilizan las siguientes formulas:

- Masa unitaria.

$$M = (G - T) / V$$

Donde:

M = Masa unitaria del agregado (Kg/m<sup>3</sup>)

G = Masa del agregado más molde (Kg)

T = Masa del molde (Kg)

V = Volumen del molde (m<sup>3</sup>)

- Porcentaje de vacíos.

$$\% \text{Vacíos} = 100 * \frac{(S * W) - M}{(S * W)}$$

Donde:

M = Masa unitaria del agregado (Kg/m<sup>3</sup>)

S = Gravedad especifica seca determinada de acuerdo a la NTC 176 y NTC 237.

W = densidad del agua (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

**Masa unitaria suelta de los agregados.**

Con base a lo establecido en la norma NTC 92, se procedió a realizar el ensayo de masa unitaria suelta tanto para el agregado grueso y fino con el molde seleccionado en la Tabla 18. obteniendo como resultados obtenidos los que se denotan en la Tabla 20.

Tabla 20.

*Datos y resultados del ensayo de masa unitaria suelta en agregados finos y gruesos.*

Descripción	Agregado grueso	Agregado fino
Masa del molde (kg)	4,513	4,692
Masa del molde + muestra (kg)	8,268	9,215
Volumen del molde (m <sup>3</sup> )	0,003	0,003
Masa unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1243,76	1498,14

Fuente: Elaboración propia.

### **Masa unitaria compactada de los agregados.**

Con base a lo establecido en la norma NTC 92, se procedió a realizar el ensayo de masa unitaria compactada tanto para el agregado grueso y fino con el molde seleccionado en la Tabla 20, dando como resultado obtenidos los descritos en la Tabla 21.

Tabla 21.

*Datos y resultados del ensayo de masa unitaria compactada en agregados finos y gruesos.*

Descripción	Agregado grueso	Agregado fino
Masa del molde (kg)	4,51	4,69
Masa del molde + muestra (kg)	8,66	9,66
Volumen del molde (m <sup>3</sup> )	0,003	0,003
Masa unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1373,60	1646,20

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 16.* Ensayo de masa unitaria compactada de agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

#### **7.3.2.4 Densidad relativa y absorción de los agregados**

Es conocido como densidad a la relación existente entre la masa y el volumen de un agregado, entonces para tanto el agregado grueso y fino se le desarrollaron los ensayos con base las normas NTC 237 y la NTC 176.

##### **Agregado fino natural.**

Los datos obtenidos del ensayo experimentalmente se ven descritos en la Tabla 22 luego del procedimiento inicial de humedecimiento y secado fueron los siguientes:

Tabla 22.

*Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural.*

Ítems	Agregado fino
S1. (Masa de la muestra saturada y superficialmente seca usado en el frasco de Le Chatelier) gr	56
R1. (Lectura inicial del nivel del agua en el frasco de Le Chatelier) cm	0,8
R2. (Lectura final del nivel del agua en el frasco de Le Chatelier) cm	22
S (Masa de la muestra saturada y superficialmente seca) gr	502
A. (Masa en el aire de la muestra secada al horno) gr	494

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente Figura 17 se encuentra la demostración del ensayo de cono para obtener una humedad superficial correcta.



*Figura 17. Ensayo de cono para humedad superficial. Fuente: Elaboración propia.*

Una vez obtenidos los datos iniciales descritos en la tabla anterior se procede a realizar la formulas propuestas por la norma para hallar las siguientes densidades y el valor de absorción observados en la Tabla 23:

Tabla 23.

*Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural.*

RESULTADOS AFN	
Densidad superficialmente seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,59
Densidad seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,55
Absorción (%)	1,62

Fuente: Elaboración propia.

### **Agregado grueso natural.**

Los datos obtenidos luego del procedimiento inicial de humedecimiento y secado del agregado grueso son los observados en la Tabla 24 descrita a continuación, así como en la figura 18 se observa el momento en el que se realizó el ensayo de saturación del agregado grueso.

Tabla 24.

*Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.*

Ítems	Agregado grueso
A. (Masa de la muestra seca al horno) kg	3
B. (Masa de la muestra saturada y SSS) kg	3,12
C. (Masa aparente de la muestra saturada en agua) kg	1,99

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 18. Ensayo del agregado grueso natural sumergido. Fuente: Elaboración propia.*

Una vez obtenidos los datos iniciales descritos en la tabla 24 anterior, se procede a realizar la formulas propuestas por la norma para hallar las siguientes densidades y el valor de absorción que se pueden detallar en la Tabla 25:

Tabla 25.

*Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.*

RESULTADOS AGN	
Densidad superficialmente seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,78
Densidad seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,67
Absorción (%)	4,00

Nota: Resultados que se obtuvieron del ensayo de densidad del agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.2.5 Resumen de las propiedades de los agregados.

A continuación, en la Tabla 26, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales por medio de los ensayos expuestos en los puntos anteriores, y con los cuales se trabajará para la elaboración de los diseños de mezcla, son los siguientes:

Tabla 26.

*Resumen general de las propiedades de los agregados a utilizar en la elaboración de concretos.*

Descripción	Agregado fino	Agregado grueso	Unidades
Humedad natural	0,50	0,70	%
Módulo de finura	1,80	-	-
Tamaño máximo (TM)	-	1	pulg.
Tamaño máximo nominal (TMN)	-	1	pulg.
Masa unitaria suelta	1498,14	1243,76	$\text{kg}/\text{m}^3$
Masa unitaria compactada	1646,20	1373,60	$\text{kg}/\text{m}^3$
Densidad seca	2,55	2,67	$\text{gr}/\text{cm}^3$
Absorción	1,62	4,00	%

Nota: Resumen general de resultados obtenidos de los ensayos a los materiales del concreto para conocer las propiedades generales de los agregados. Fuente: Elaboración propia.

## 7.5 Diseño y elaboración de mezcla

### 7.5.1 Diseño de mezcla método ACI del comité 211.1

Teniendo como referencia la caracterización de los materiales a utilizar, se procedió con la realización del diseño de mezcla mediante la metodología de la A.C.I y del método de Fuller Thompson para la mezcla de los agregados.

Como primera medida se define la resistencia a compresión deseada a los 28 días, la resistencia deseada es de 3000 psi o 210 kg/cm<sup>2</sup>. La mezcla contará con un tamaño máximo del agregado de 1" según la granulometría obtenida en la caracterización de los materiales, además se determinó un asentamiento de 3" para una consistencia plástica de la mezcla.

De acuerdo con la Tabla 27 se estima el contenido de aire en porcentaje esperado para el concreto, para este caso es de 1.5%.

Tabla 27.

*Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximo de agregados*

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulg.	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9,51	3/8	3	4,5	6,0	7,5
12,7	1/2	2,5	4,0	5,5	7,0
19,0	3/4	2,0	3,5	5,0	6,0
25,4	1	1,5	3,0	4,5	6,0
38,1	1 1/2	1,0	2,5	4,5	5,5
50,6	2	0,5	2,0	4,0	5,0
76,1	3	0,3	1,5	3,5	4,5
152,0	6	0,2	1,0	3,0	4,0

Nota: Cantidad de aire en la mezcla a obtener según el tipo de exposición que va a tener el concreto.  
Adaptada de (De Guzman Sanchez, 2001)



Así mismo, en la Tabla 28 se estima el contenido de agua en litros necesario para cumplir con la función de hidratación y fluidez de la mezcla, siendo 188 litros por metro cubico de concreto teniendo en cuenta presencia partículas de forma angular y textura rugosa, en un concreto sin aire incluido.

Tabla 28.

*Requerimientos aproximados de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido*

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm							
		9,51	12,7	19,0	25,4	38,1	50,8	64	76,1
mm	pulg	Agua de mezclado, en kg/m3 de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	170	151	144
75	3	241	218	203	188	175	175	156	148
100	4	244	221	207	192	179	179	159	151
125	5	247	225	210	196	183	183	162	153
150	6	251	230	214	200	187	187	165	157
175	7	256	235	218	205	192	192	170	163
200	8	260	240	224	210	197	197	176	168

Nota: Cantidad de agua a adicionar según el tamaño máximo del agregado y la fluidez o asentamiento.  
Adaptada de (De Guzman Sanchez, 2001)

Debido a que no hay registros de pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares a las que tendremos a lo largo de la investigación, se determina la resistencia de diseño según la Tabla 29, siendo unos 295 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 29.

*Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar*

Resistencia especifica $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia de diseño de la mezcla $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Menos de 210	$f'_c + 70$
de 210 a 350	$f'_c + 85$
Mas de 350	$f'_c + 100$

Nota: factor de aumento de la resistencia de diseño de la mezcla de concreto cuando no se tienen datos estadísticos. Adaptada de (De Guzman Sanchez, 2001)

La resistencia del concreto es afectada principalmente por la resistencia e interacción de las fases que lo constituyen, es muy frecuente que los diferentes agregados y cementos produzcan resistencias distintas con la misma relación agua-cemento. Según la siguiente Figura 19 se obtiene la relación agua/cemento de la mezcla resultando un valor de 0.46.

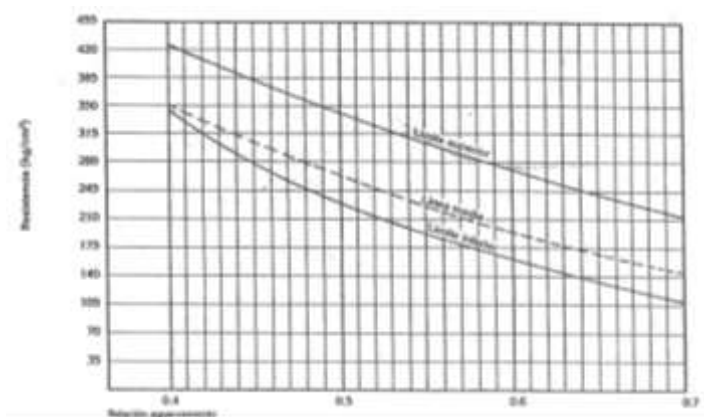


Figura 19. Correspondencia entre la resistencia a compresión y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo 1 en concretos sin aire incluido. Fuente: (De Guzman Sanchez, 2001)

Con la relación agua/cemento y la cantidad en litros de agua se obtiene la cantidad de cemento por metro cubico de concreto, siendo esta cantidad 406.93 kg de cemento Argos.

Debido a que en la caracterización de los agregados se obtienen valores fuera de los parámetros de las tablas proporcionadas por el método ACI para el diseño de mezcla, la mezcla de los agregados y la proporción de estos se analizaron mediante la metodología de Fuller Thomson, que en la Tabla 30 se tiene una gradación de materiales especificadas y que la mezcla de los agregados utilizados para el diseño de mezcla deben aproximarse lo máximo posible a la gradación de áridos de Fuller Thomson (Rodriguez, 2018), después de determinar los módulos granulométricos a partir de la gradación de los agregados, se obtienen como resultado los porcentaje de agregado grueso del 55.11% y agregado fino del 44.89%.

Tabla 30.

*Gradación de materiales metodología de Fuller Thomson*

Tamaño agregado (mm)	Granulometría arena	Granulometría grava	Gradación Fuller	Mezcla de agregados
25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
19,05	100,0	46,69	86,6	70,62
12,7	100,0	10,23	70,71	50,53
9,52	100,0	2,15	61,24	46,07
4,75	100,0	0,04	43,24	44,91
2,36	100,0	0,0	30,48	44,89
1,18	99,8	0,0	21,55	44,79
0,85	87,14	0,0	18,29	39,11
0,3	24,29	0,0	10,87	10,9
0,15	9,18	0,0	7,68	4,12
0,075	0,41	0,0	5,43	0,18
Modulo granulométrico	MGa	MGg	MGd	MG
	1,79	8,40	5,43	5,43

Nota: mezcla de granulometrías de los agregados para obtener la gradación de los agregados grueso y fino y módulos granulométricos donde MGa es el módulo de la arena, MGg es el módulo de la gravilla y MGd es el módulo de Fuller Fuente: (Rodriguez, 2018)

Seguidamente en la Tabla 31 se calcula el volumen que ocupan los agregados en la mezcla, este es de 668 litros por metro cubico de concreto, y con la densidad aparente seca de la

mezcla (Ga) se calcula la masa total de los agregados que al multiplicarlo por el porcentaje de agregados correspondiente se obtiene el peso seco para los agregados grueso y fino, que correspondería a 964.45 kg y 785.59 kg respectivamente.

Tabla 31.

*Estimación de proporción de los agregados*

Descripción	Datos	Und	Descripción	Datos	Und
Volumen Cemento	0,129	m <sup>3</sup>	Ga	2,62	g/cm <sup>3</sup>
Volumen agua	0,188	m <sup>3</sup>	Masa de agregados	1750,04	Kg
Volumen aire	0,015	m <sup>3</sup>	Masa AGN	964,45	kg
Volumen agregado	0,668	m <sup>3</sup>	Masa AFN	785,59	Kg
Agregado grueso	55,11	%	-	-	-
Agregado fino	44,89	%	-	-	-

Nota: El Ga es la densidad aparente seca de la mezcla calculada con las densidades secas de los agregados y sus respectivos porcentajes. Masa AGN es agregado grueso natural y Masa AFN agregado fino natural. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza una corrección debido a la humedad de los agregados según el agua que aportan a la mezcla siendo en este caso, para un a humedad de agregados grueso y fino de 0.70% y 0.50% respectivamente, el contenido de agua total de 228.63 litros y el peso húmedo del agregado grueso de 971.20 kg y del agregado fino 789.52 kg.

Tabla 32.

*Corrección debido a la humedad de los agregados según el agua que apropian a la mezcla*

Descripción	Datos	Unidad	Descripción	Datos	Unidad
Masa w agregado grueso natural	971,2	kg	Aporte de agua de AGN	31,83	Lts.
Masa w agregado fino natural	789,52	kg	Aporte de agua de AFN	8,8	Lts.
Contenido de agua				228,63	Lts.

Nota: Corrección de la cantidad de agua de la mezcla según la cantidad de agua que proporción la humedad de los agregados a la mezcla de concreto. Fuente: Elaboración propia.

La proporción de la mezcla queda de la siguiente manera descrita en la Tabla 33.

Tabla 33.

*Proporción de mezcla de concreto*

Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua
1	1.94	2.38	0.56

Nota: Proporción de la mezcla para concreto de 3000 psi de resistencia. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se completa el proceso para el diseño de mezcla de un concreto con resistencia a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$  con resistencia de diseño de  $295 \text{ kg/cm}^2$  con tamaño máximo de agregado de 1" y asentamiento de 3" para consistencia plástica, se resumen las cantidades de los ingredientes de la mezcla en la siguiente tabla:

Tabla 34.

*Resumen de cantidades de materiales necesarios para mezcla de concreto por metro cubico*

Material	Peso Seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso Húmedo Para 440 Lts de mezcla (kg)
Cemento	406.93	406.93	179.048
Agregado fino natural	785.59	789.52	347.389
Agregado grueso natural	964.45	971.2	427.327
Agua	188	228.63	100.595
Total	2344.97	2396.27	1054.36

Nota: A manera de ejemplo se calcula la cantidad de materiales necesarios para para 440 litros de mezcla. Fuente: Elaboración propia.

### 7.5.2 Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto

Luego de calcularse los parámetros para las dosificaciones de las diferentes mezclas de concreto, se procedió a iniciar el proceso de preparación de los diferentes concretos y la fabricación de los especímenes de ensayo para los cuatro tipos de mezclas que se desarrollaran que se plantean en la Tabla 2. Los concretos fueron desarrollados en las instalaciones de la universidad de la costa, donde se habilito el laboratorio de diseño de mezclas y tecnología de los materiales, y la empresa CONSULTECH S.A.S para la elaboración de los especímenes realizados.

#### 7.5.2.1 Equipos y herramientas.

Los cuatro tipos de concretos fueron elaborados como se mencionó en el ítem anterior con las herramientas y equipos necesarios proporcionados por la Universidad de la Costa.

Los equipos y herramientas utilizadas y sus especificaciones para la elaboración de los concretos y especímenes fueron:

- Maquina mezcladora: Con capacidad de 210 L, marca Bauker.

- Moldes cilíndricos: metálicos, con dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y de 10 cm de diámetro por 20 de altura.
- Moldes de viguetas: De material de acero, con dimensiones de 50 cm de largo por 15 cm de alto y 15 cm de ancho.
- Recipientes de plástico y palas: Para vaciado del concreto.
- Maso de goma: Para compactación del concreto en los moldes según los especificado por la norma.
- Varilla de acero: Con las especificaciones de la NTC 1377.
- Balanza para pesado de material.
- Cono de Abrams, para la medición del asentamiento del concreto es estado fresco.
- Herramientas menores: todo tipo de herramientas necesarias a lo largo de la fabricación como pinzas, llaves, etc.

#### **7.5.2.2 Procedimiento de elaboración del concreto.**

El procedimiento que se ejecutó para la realización de los concretos fue el siguiente:

- Se alista el diseño de mezcla verificando las condiciones de humedad de los agregados a utilizar.
- Se pesan los agregados y el cemento para el concreto de control, en el caso cuando se fabricaron los concretos con fibras se pesaron de igual forma para adicionarlos al concreto.
- Se mezclan los diferentes agregados para el concreto de control adicionando el agua necesaria según el diseño de mezcla de poco en poco. En el caso del concreto con fibras se mezclan los agregados y se adicionan las fibras dejando mezclar aproximadamente de

3 a 5 minutos iniciales y poder tener un mezclado uniforme como se puede observar en la Figura 20 y 21.



*Figura 20.* Mezclado de agregados con fibra sintética Toxement. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 21.* Mezclado de agregados con fibra reciclada PET. Fuente: Elaboración propia.

- Luego de mezclar todos los agregados se procede a realizar el procedimiento del ensayo de asentamiento determinado en la norma NTC-396 para cada mezcla y garantizar que



cumpla con el asentamiento seleccionado en el diseño de mezcla como se ilustra en la Figura 22.



*Figura 22. Realización del ensayo de asentamiento. Fuente: Elaboración propia.*

- Se procede con una brocha aplicar un desmoldante a las probetas cilíndricas y a las viguetas para que cuando el concreto pase a estado endurecido después del fraguado de 24 horas poder desencofrar los especímenes sin afectarlos.
- Como se mencionó en el paso anterior luego de vaciar los especímenes se espera 24 horas para desencofrar los cilindros como se ilustra en la Figura 23, es recomendable que los especímenes fraguaran en una zona seca y no expuesta a altas temperaturas para garantizar una mejor muestra.



Figura 23. Fraguado de concreto de control. Fuente: Elaboración propia.

- Se procede a pesar y marcar cada uno de los especímenes como se observa en la Figura 24, para luego introducir en el tanque de curado y cumplan los tiempos requeridos.



Figura 24. Desencofrado de especímenes concreto de control. Fuente: Elaboración propia.

- Después de cumplir con el curado establecido se extraen y se procede al ensayo de cada uno de los especímenes en estado endurecidos mencionados en la Tabla 3.



*Figura 25. Curado en tanque de especímenes de concreto. Fuente: Elaboración propia.*

### **7.5.2.3 Procedimiento de ensayos del concreto.**

Para los ensayos del concreto en el laboratorio de tecnología de los materiales de la Universidad de la Costa y de CONSULTECH S.A.S, se procede a extraer cada muestra cilíndrica y viguetas después de su respectivo curado para ensayar en la máquina de compresión y flexión basándose en las normas NTC 673 y 2871 respectivamente. En el anexo B se logran ver más información fotográfica en donde se están haciendo los ensayos a las muestras. Al momento de realizar estos ensayos las muestras se transportaban con cuidado para ensayar inmediatamente sin que perdieran humedad.



*Figura 26.* Ensayos de cilindros en laboratorio de tecnología de los materiales de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

## 8. Resultados y discusiones

Después de realizar los concretos como se describió en el diseño metodológico, al concreto en estado fresco y endurecido se le hicieron los ensayos pertinentes, en donde para estado fresco se realizó el ensayo de asentamiento el cual para los cuatro tipos de concretos que se realizaron se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 35 que se muestra a continuación.

Tabla 35

### *Resultados ensayo de asentamiento*

Concreto control sin fibra (pulg)	Fibra Toxement (pulg)	Fibra PET (0,2%) (pulg)	Fibra PET (0,35%) (pulg)
3	2.8	2.5	2.3

Nota: Resultado de ensayo de asentamiento de los concretos. Fuente: Elaboración propia.

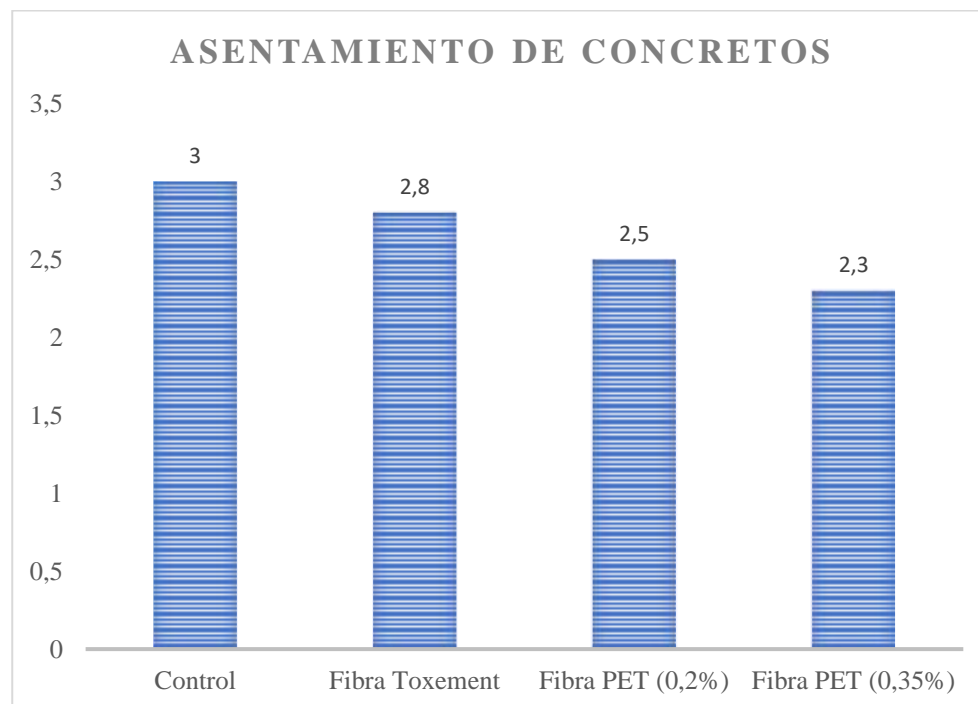


Figura 27. Gráfico de barras ensayos de asentamiento para los concretos. Fuente: Elaboración propia

Después de realizar los especímenes y esperar las fechas de curado se le realizaron los ensayos a compresión y a flexión, estos se encuentran ordenados principalmente en 4 etapas correspondientes a los diferentes tipos de cilindros elaborados, cilindros de control sin ningún tipo de fibra, cilindros con fibras Toxement, y los cilindros con fibras de botellas PET recicladas, estos últimos se elaboraron con 2 porcentajes de fibra correspondientes al 0,2% y 0,35% del volumen de concreto. Además, cada etapa contempla cilindros de 2 dimensiones diferentes, un cilindro estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, y un cilindro de menor dimensión de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto, con la intención de determinar algún tipo de variación en la resistencia a causa del cambio de dimensiones.

Después de realizar las muestras de concreto se esperó el día de ensayo para tomar la masa en estado endurecido y con la cual se obtuvieron los resultados de densidad para los diferentes concretos. Estos resultados se pueden observar individualmente en el anexo A, los datos promedios se encuentran organizados en las Tabla 36 y 37 que se observa a continuación.

Tabla 36

*Promedio de densidades cilindros ( $kg/cm^3$ )*

Días de curado	Dimensiones	Control	Fibra Toxement	Fibra PET (0,2%)	Fibra PET (0,35%)
4	15 x 30	2411,0	2377,0	2344,0	2328,0
7		2437,7	2414,3	2342,7	2327,0
28		2426,0	2437,3	2405,7	2359,7
4	10 x 20	2358,0	2324,0	-	-
7		2397,3	2313,3	-	-
28		2402,7	2344,7	-	-

Nota: Promedio de densidades obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37

*Promedio de densidades viguetas (kg/cm<sup>3</sup>)*

Días de curado	Control	Fibra Toxement	Fibra PET (0,2%)	Fibra PET (0,35%)
7	2330	2320	2360	2330
28	2330	2340	2360	2310

Nota: Promedio de densidades obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

La comparación final de las resistencias obtenidas y la desviación estándar de los especímenes se resume en las Tablas 38-39 para los cilindros y en la tabla 40 para las viguetas, donde se puede observar un promedio correspondiente a los especímenes ensayados en un mismo día de acuerdo con el tiempo de curado. En el anexo A se encuentran los datos individuales de compresión y flexión para todos los tipos de muestras.

Tabla 38

*Promedio de resistencias de cilindros 15 x 30 cm (MPa) y desviación estándar (MPa)*

Días de curado	Control	S	Fibra Toxement	S	Fibra PET (0,2%)	S	Fibra PET (0,35%)	S
4	18,8	0,82	18,21	0,97	16,93	0,39	18,53	0,82
7	22,91	1,02	21,97	0,55	18,98	1,65	22,51	0,77
28	30,47	0,19	31,8	2,79	27,46	0,87	28,49	1,98

Nota: Contiene el promedio de resistencia de cada uno de los tipos de concretos que se ensayaron, Fuente: Elaboración propia,

Tabla 39

*Promedio de resistencias de cilindros 10 x 20 cm (MPa) y desviación estándar (MPa)*

Días de curado	Control	S	Fibra Toxement	S	Fibra PET (0,2%)	Fibra PET (0,35%)
4	20.94	0,80	20.76	0,27	-	-
7	24.32	0,70	25.33	0,54	-	-
28	30.96	1,72	32.30	1,06	-	-

Nota: Contiene el promedio de resistencia de cada uno de los tipos de concretos que se ensayaron. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40

*Promedio de resistencias de viguetas (MPa) y desviación estándar (MPa)*

Días de curado	Control	S	Fibra Toxement	S	Fibra PET (0,2%)	S	Fibra PET (0,35%)	S
7	2.86	0,13	2.47	0,09	2.47	0,17	2.52	0,10
28	3.26	0,28	3.19	0,05	3.05	0,15	3.06	0,56

Nota: Contiene el promedio de resistencia de cada uno de los tipos de concretos que se ensayaron. Fuente: Elaboración propia.

En la medición de la trabajabilidad de la mezcla, la Figura 27 muestra la reducción del asentamiento en la mezcla de concreto cuando se le añade fibra comercial y fibra PET en diversas cantidades. Se puede observar que para una relación a/c constante, a medida que aumenta la cantidad de fibras PET, disminuye el asentamiento. Las fibras PET tienen mayor superficie específica en comparación con la arena de la mezcla. Por tanto, ocurriría más fricción entre las partículas, lo que conduciría a una menor trabajabilidad en la mezcla. Las diversas propiedades de la mezcla que incluyen fluidez, homogeneidad entre otros, varían al agregar este tipo de polímeros, especialmente la fluidez y los factores de compactación. A medida que aumenta el contenido de PET, la plasticidad y la consistencia del concreto fresco disminuyen.

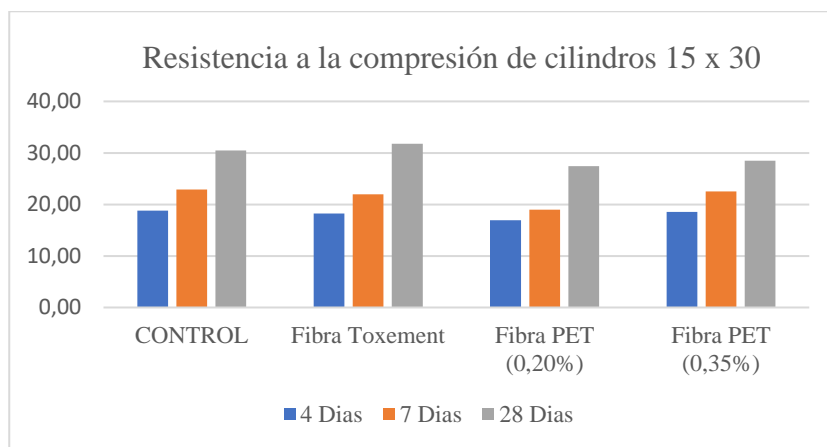
Después de realizar el proceso de fraguado a las probetas de concreto durante 24 horas y luego de cumplir su edad de curado, se procedió a tomar el peso de cada uno de los especímenes



con el fin de hallar las densidades de cada espécimen de acuerdo con el tiempo de curado transcurrido y al tipo de concreto, para lo cual los resultados obtenidos se enumeran en la Tabla 40. las densidades de los especímenes para cada uno de los diferentes tipos de concretos, a medida que pasa el tiempo de curado los pesos unitarios a su vez van incrementando. Sin embargo, haciendo una comparación de los concretos con fibras PET y los concretos de control, al alcanzar los 28 días de curado se puede observar que al tener un porcentaje de fibra de 0.35% la densidad se reduce 2.73% con respecto al concreto de control. Así como para un porcentaje de fibra PET de 0.2% la densidad se reduce un 0.83%. Observando que, a mayor cantidad de fibra la densidad del concreto disminuye, esto puede resultar ya que las fibras generan vacíos en el concreto proporcionando así una ligera disminución en la proporción de materiales en cada uno de los especímenes.

Para investigar la resistencia a la compresión, se fabricaron especímenes cilíndricos con diferentes tipos y contenidos de fibras. Los efectos del tamaño y la forma de los especímenes de concreto PET en cuanto a la resistencia a la compresión se investigaron utilizando muestras cilíndricas. El número de muestras y sus resistencias a la compresión promedio medidas después de 4, 7 y 28 días se expresan en la Tabla 38. Como se muestra en la Figura 28, los cilindros con fibra Toxement mantienen un comportamiento similar a los cilindros de control en los primeros días de curado. Sin embargo, la resistencia final a los 28 días se ve incrementada en un 4,36%. Con respecto a los cilindros con fibras PET se observa que un porcentaje de fibra menor al 0,35% del volumen de concreto, conduce a un comportamiento deficiente en los primeros días de curado y específicamente con un porcentaje de fibra de 0,20%, la resistencia final a los 28 días se ve afectada en una disminución del 9,89%, nuevamente con respecto a los cilindros de control. Con un porcentaje de fibra igual a 0,35%, provoca un comportamiento similar a los cilindros de

control en los primeros días de curado y presenta una ligera disminución en su resistencia final a los 28 días de 6,5%. Este comportamiento tiene lugar debido a la débil cohesión que existe dentro del concreto por la textura y forma de las fibras PET, que actúan como una barrera que impide que la pasta de cemento se adhiera a los agregados. Como resultado no se presenta una fricción significativa como con los cilindros de control, provocando que la resistencia del concreto disminuya gradualmente. Sin embargo, los cilindros con fibras Toxement y fibras PET no presentaron el mismo comportamiento al llegar al punto máximo de carga donde el cilindro llega a la falla. La adición de fibras tiene una gran influencia en el comportamiento posterior al agrietamiento del concreto, ambos tipos de fibras mejoran significativamente la tenacidad de los especímenes, la mejora de tenacidad es evidente ya que permiten unir el concreto a cada lado de la sección agrietada.

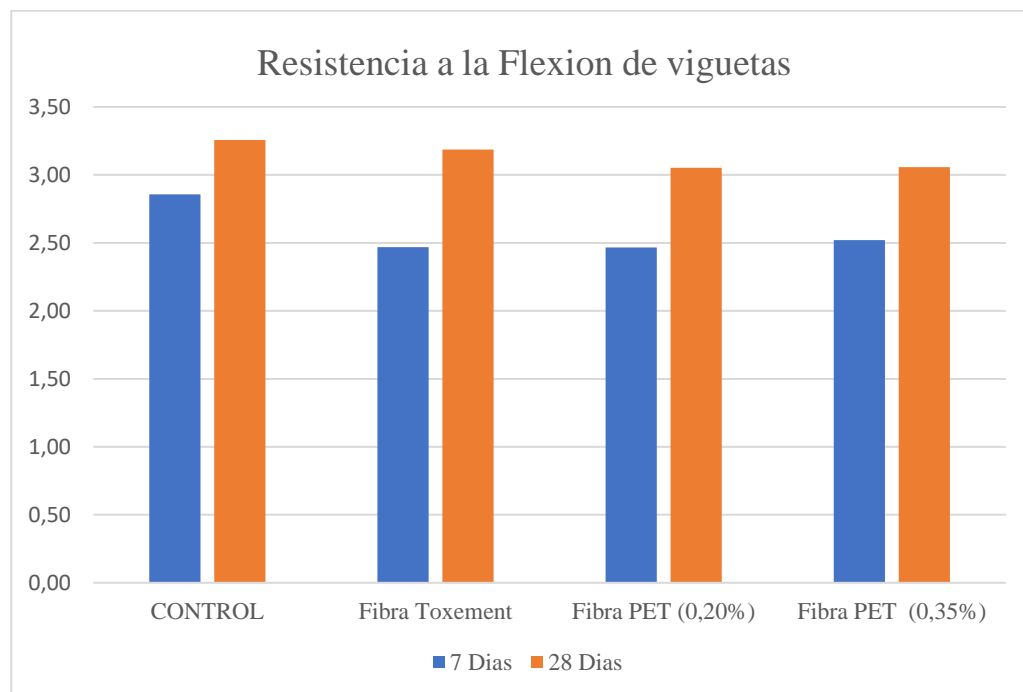


*Figura 28.* Gráfico de barras ensayos de resistencia a la compresión de los concretos. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de determinar la resistencia a la flexión del concreto con diferentes tipos y contenidos de fibras. El número de muestras y sus resistencias a la flexión promedio medidas después de 7 y 28 días se expresan en la Tabla 40. Como se muestra en la Figura 29 , se puede

observar que los especímenes con porcentajes de fibra PET de 0,20% y 0,35 % muestran una disminución del 6,24% en la resistencia a la flexión a comparación con los especímenes de control. Además, ambos porcentajes de fibras mantienen el mismo comportamiento frente al sometimiento del espécimen a un esfuerzo a flexión, indicando así, que para este rango de porcentajes de fibra obtendremos valores similares de resistencia.

En cuanto a los especímenes reforzados con la fibra Toxement, presentaron una disminución de la resistencia a la flexión a los 28 días del 2,15% con respecto a los especímenes de control. Por otra parte, los especímenes con fibras Toxement y PET no sufrieron una rotura total ni instantánea, como sí lo hicieron los especímenes de control, gracias a la considerable ductilidad que ofrece la presencia de las fibras. El uso de las fibras produce ciertas deficiencias en la estructura interna del concreto que provocan una reducción de la rigidez y de la resistencia a la tracción, lo cual resulta beneficioso cuando se necesita ductilidad, además de generar una especie de malla tridimensional que intercepta las fracturas que se van produciendo en el espécimen. Este comportamiento indica que los especímenes continúan resistiendo y manteniendo su integridad, lo que significa que el espécimen tiene la posibilidad aun de transmitir deformaciones.



*Figura 29.* Gráfico de barras ensayos de resistencia a la flexión de los concretos. Fuente: Elaboración propia.

Para Rahmani (2013), las propiedades del concreto en estado fresco, como el asentamiento, se vieron afectadas de la misma manera debido a la adición de partículas PET al concreto, en varias cantidades y con diferentes relaciones agua/cemento. La afectación radica en la disminución del asentamiento de la mezcla a medida que el porcentaje de partículas PET incrementaba para una relación agua/cemento constante. Además, este efecto fue más significativo cuando se aumentaba la relación agua/cemento.

Según Kim, Yi, Kim, Kim, & Song (2009), adicionar fibras PET en un porcentaje de volumen entre 0,50% y 1% de la mezcla provoca una disminución de la resistencia a la compresión de los especímenes entre 1% y 9% a comparación de los especímenes de control. Estos resultados son similares a los obtenidos en esta investigación, pero con los porcentajes de fibra PET de 0,20% y 0,35%. La diferencia se encuentra en el tratamiento dado en la superficie

de la fibra PET con un revestimiento de anhídrido maleico para mejorar la adherencia y las características de fricción de la fibra PET en la mezcla. Permitiendo así, utilizar porcentajes de fibra más altos sin disminuir significativamente la resistencia a la compresión y obtener mayores índices de ductilidad y tenacidad proporcionados por la fibra.

En el trabajo de Rahmani (2013), el rango de porcentajes del 5% al 15% de reemplazo del agregado fino por partículas PET en el concreto, presentó un comportamiento diferente en la resistencia a la compresión de los especímenes al obtenido, en donde a medida que aumentaba la tasa de reemplazo de arena por partículas PET, la resistencia a la compresión tenía una tendencia creciente al principio, pero disminuía al seguir aumentando el porcentaje de reemplazo. Aumentos de resistencia del 8,86% y 11,97% debido al reemplazo del 5% del volumen de arena por partículas PET con una relación agua/cemento de 0,42 y 0,54, respectivamente. Y, reducciones de resistencia del 5,11% y 8,45% debido al reemplazo del 15% del volumen de arena por partículas PET con una relación agua/cemento de 0,42 y 0,54, respectivamente. Para porcentajes bajos de partículas PET, se produjo una condición de entrelazamiento entre las partículas PET y superficies fracturadas debido a la tenacidad que brindan las partículas PET y a su flexibilidad. Pero, al aumentar el porcentaje de partículas PET, la débil cohesión de las partículas PET impidió la adherencia adecuada con los agregados de la mezcla, provocando que la fricción no sea significativa y por tanto una disminución gradual de la resistencia a compresión del concreto. Por otra parte, la variación de las resistencias para relaciones agua/cemento más bajas fue más significativa.

El comportamiento a compresión puede analizarse desde un cambio en la forma de los especímenes ensayados, tal y como lo planteó (Borg, 2016), utilizando especímenes cúbicos de 150 mm y adicionando fibras PET en porcentajes entre 0,5% y 1,5%. La adición de fibras PET

no tuvo mayor beneficio sobre la resistencia a la compresión de los especímenes. Observaron que los valores de resistencia variaron de 0,5% a 8,5% en comparación con los especímenes de control. Las fibras rectas mostraron una reducción más fuerte para porcentajes más bajos y ninguna variación significativa adicional al aumentar el porcentaje de fibra.

En cuanto a los resultados de los ensayos para determinar el comportamiento a la flexión de los especímenes con refuerzo de fibra Toxement y fibra PET, todos los especímenes se mantuvieron cerca de la misma resistencia, pero la diferencia se encuentra en el comportamiento de las viguetas después de la fisura, donde las viguetas con refuerzo de fibra Toxement y fibra PET nunca llegaron al colapso, debido a la capacidad de las fibras para atrapar micro y macro fisuras limitando así la apertura. Este comportamiento es ilustrado por (Foti, Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, 2010), sus 6 ejemplares con diferentes tipos y cantidades de fibra registraron una carga máxima alrededor de los 8 kN. De manera que, una vez alcanzada la carga máxima para los especímenes sin refuerzo de fibra, se presentó un comportamiento frágil y se generó una fractura repentina, con muy pequeñas deformaciones. Por otra parte, los especímenes con refuerzo de fibra, al aumentar la flexión, la rotura progresaba de forma continua pero nunca se presentó el colapso de la vigueta, ya que una vez el concreto había fallado, la carga soportada se transmitía a las fibras.

Para Rahmani (2013), el reemplazo de arena por partículas PET produjo un comportamiento diferente a la flexión en los especímenes al obtenido. En donde a medida que aumentaba la tasa de reemplazo de arena por partículas PET, la resistencia a la flexión tenía una tendencia creciente al principio, pero disminuía al seguir aumentando el porcentaje de reemplazo. Aumentos de resistencia del 6,71% y 8,02% debido al reemplazo del 5% del volumen de arena por partículas PET con una relación agua/cemento de 0,42 y 0,54, respectivamente. Y,

reducciones de resistencia del 14,7% y 6,25% debido al reemplazo del 15% del volumen de arena por partículas PET con una relación agua/cemento de 0,42 y 0,54, respectivamente. Se observó que para la resistencia a la flexión comparando relaciones agua/cemento con el mismo porcentaje de reemplazo de partículas PET, la relación agua/cemento de 0,54 da menor resistencia.

## 9. Conclusiones

En este estudio experimental, se agregaron fibras PET de botellas recicladas al concreto como un medio para mejorar el material y el rendimiento estructural. El beneficio ecológico de utilizar efectivamente este material de desecho es otra motivación principal para este trabajo.

La trabajabilidad de la mezcla, medida como el asentamiento, se ve afectada a medida que se aumenta el porcentaje de fibra en una relación agua/cemento constante, ya sea utilizando fibras Toxement o fibras producto de botellas PET recicladas.

De las pruebas para el comportamiento de los especímenes a compresión, las fibras de botellas PET utilizadas como refuerzo en el concreto exhibieron una ligera disminución en la resistencia a la compresión entre el 6 y 9 % comparado con muestras de control sin fibras de refuerzo. Además, sin un tratamiento adecuado en la superficie de la fibra PET para mejorar la adherencia a los componentes del concreto, utilizar un porcentaje de fibra por debajo del 0.35 % del volumen de mezcla, ocasiona un comportamiento inferior del concreto comparado con una mezcla sin refuerzo de fibra.

De las pruebas de flexión, todos los especímenes ensayados se mantuvieron cercanos a una resistencia a la flexión de 3,10 MPa sin cambios significativos por tipo y/o cantidad de fibra agregada en la mezcla. Lo que diferencia a cada espécimen de otro es su comportamiento post-fisura, donde la ductilidad y tenacidad proporcionada por la adición de fibras evitan que se produzca un colapso total de la vigueta.

El uso de fibras de botellas PET recicladas en el concreto conduce a mejoras interesantes en el rendimiento de varias características del concreto, incluso asemejándose al rendimiento aportado por las fibras Toxement, ofreciendo una alternativa potencial para este material y por lo cual se recomienda su uso para el control de la fisuración por retracción plástica.



Para futuros experimentos en el tema es recomendable implementar un proceso que permita mejorar la adherencia de la superficie de la fibra PET con los agregados de la mezcla, por tanto, se evitaría la generación de espacios entre los materiales y de esta manera conseguir la fricción necesaria para posiblemente obtener mejores resultados y un comportamiento óptimo de la fibra en la mezcla. Además, utilizar agregados que se ajusten a los límites granulométricos establecidos por el método ACI.211.1, y a su vez se podrían utilizar diferentes gradaciones y porcentajes en los agregados para llegar a la combinación que permita el máximo rendimiento de la fibra PET adicionada como refuerzo en la mezcla.

### Referencias

- Arapack. (31 de 01 de 2018). *Arapack*. Obtenido de <https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/>
- Argos . (2019). *Argos*. Obtenido de <https://argos.co/Productos>
- Barrios, N. (26 de Marzo de 2019). Causas y efectos de la contaminación de las playas. *EL HERALDO*.
- Borg, R. P. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 29-47.
- CONCRETO, 3. E. (s.f.). *360 en concreto*. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-concreto-reforzado-con-fibras>
- De Guzman Sanchez, D. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DELMORTERO*. Santa Fe De Bogota.
- Foti, D. (2010). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 1906-1915.
- Foti, D., & Paparella, F. (2014). Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids. *Mechanics Research Communications*, 57-66.
- Fraternali, F. (2014). Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. *Construction and Building Materials*, 293-302.
- Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J.-H. J., & Song, Y. C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 32, 232-240.

- Mohammed, A. (2017). Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 595-605.
- Morales, I. G. (28 de MARZO de 2018). Desarrollo sostenible, un aliado del medio ambiente. *EL ESPECTADOR*.
- NTC-107. (2006). Metodo de ensayo para determinar la expansion en autoclave del cemento portland. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-118. (2004). Metodo de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidraulico mediante el aparato de vicat. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-176. (1995). Metodo de ensayo para determinar la densidad y la absorcion del agregado grueso. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-1776. (1994). Metodo de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-220. (2004). Determinacion de la resistencia de morteros de cemento hidraulico usando cubos de 50 mm de lado. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-221. (1999). Metodo de ensayo para determinar la densidad del cemento hidraulico. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-224. (2008). Metodo para determinar el contenido de aire en morteros de cemento hidraulico. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-237. (1995). Metodo para determinar la densidad y la absorcion del agregado fino. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.
- NTC-2871. (2004). Metodo de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexion (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios). *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-294. (1998). Metodo de ensayo para determinar la finura del cemento hidraulico sobre el tamiz (No.325). *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-33. (1997). Metodo para determinar la finura del cemento hidraulico por medio del aparato de blaine de permeabilidad al aire. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-396. (1995). Metodo de ensayo para determinar el asentamiento del concreto fresco. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-4927. (2004). Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. *NORMA TECNICO COLOMBIANA*.

NTC-673. (2010). Ensayo de resistencia a la compresion de especimenes cilindricos de concreto. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-77. (1994). Metodo para el analisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

NTC-92. (1995). Determinacion de la masa unitaria y los vacios entre particulas de agregados. *NORMA TECNICA COLOMBIANA*.

Pereira, E. L., De Oliveira junior, A. L., & Fineza, A. G. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Construction and Building Materials*, 837-848.

Perez, J. M. (14 de Mayo de 2018). Desechos contaminan playas de Puerto Colombia y Salgar. *EL HERALDO*, pág. 1. Obtenido de <https://www.elheraldo.co/atlantico/desechos-contaminan-playas-de-puerto-colombia-y-salgar-494250>

profesor, N. d. (s.f.). *Nombre video*. Obtenido de Youtube: Enlace del video

Rahmani, E. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 1302-1308.

Rodriguez, A. (10 de Octubre de 2018). *ÁRIDOS Lección 5: MÉTODO de FULLER para MEZCLA de Áridos*. Obtenido de Youtube:

[https://www.youtube.com/watch?v=cTqpjUN\\_gw0&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=cTqpjUN_gw0&feature=youtu.be)

SIKA. (febrero de 2018). *SIKA S.A.* Obtenido de <https://esp.sika.com/es/concrete-redirect/sika-concrete-technology/02a001/02%20a001sa11.html>

SIKA. (2019). Concreto reforzado con fibras. *sika*, 24.

Silva, J. O. (7 de Diciembre de 2018). *360 en concreto*. Obtenido de

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/aditivos-adiciones-y-fibras/las-fibras-en-el-concreto>

Silva, J. O. (30 de Marzo de 2019). *360 en concreto*. Obtenido de

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-tipos-de-aditivos-para-el-concreto>

Toxement. (2019). *Toxement*. Obtenido de [http://www.toxement.com.co/media/3381/fibras\\_sinteticas.pdf](http://www.toxement.com.co/media/3381/fibras_sinteticas.pdf)

UMACON S.A. (28 de Marzo de 2017). *UMACON*. Obtenido de

<http://www.umacon.com/noticia.php/es/que-es-el-cemento-portland-tipo%20s%E2%80%93y%E2%80%93caracter%C3%ADsticas/413>

### Anexos

#### Anexo A. Resultados individuales probetas de concretos con fibras PET

➤ Tabla A.1 Resultados fecha de curado y masa cilindros concreto de control.

#	Dimensiones (cm)	Fecha de curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1		21/06/2019	25/06/2019	12.45
2		21/06/2019	25/06/2019	13.07
3		21/06/2019	25/06/2019	12.81
4		21/06/2019	28/06/2019	12.98
5	15 x 30	21/06/2019	28/06/2019	12.80
6		21/06/2019	28/06/2019	12.98
7		21/06/2019	19/07/2019	12.88
8		21/06/2019	19/07/2019	12.85
9		21/06/2019	19/07/2019	12.84
10		21/06/2019	25/06/2019	3.72
11		21/06/2019	25/06/2019	3.74
12		21/06/2019	25/06/2019	3.64
13		21/06/2019	28/06/2019	3.75
14	10 x 20	21/06/2019	28/06/2019	3.77
15		21/06/2019	28/06/2019	3.76
16		21/06/2019	19/07/2019	3.74
17		21/06/2019	19/07/2019	3.81
18		21/06/2019	19/07/2019	3.75

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.2 Resultados fecha de curado y masa cilindros concreto de fibra Toxement.

#	Dimensiones (cm)	Fecha de curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 30	28/08/2019	1/09/2019	12.7
2		28/08/2019	1/09/2019	12.75
3		28/08/2019	1/09/2019	12.35
4		28/08/2019	4/09/2019	12.75
5		28/08/2019	4/09/2019	12.8
6		28/08/2019	4/09/2019	12.85
7		28/08/2019	25/09/2019	12.86
8		28/08/2019	25/09/2019	12.97
9		28/08/2019	25/09/2019	12.91
10	10 x 20	28/08/2019	1/09/2019	3.65
11		28/08/2019	1/09/2019	3.65
12		28/08/2019	1/09/2019	3.65
13		28/08/2019	4/09/2019	3.65
14		28/08/2019	4/09/2019	3.65
15		28/08/2019	4/09/2019	3.6
16		28/08/2019	25/09/2019	3.63
17		28/08/2019	25/09/2019	3.71
18		28/08/2019	25/09/2019	3.69

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.3 Resultados fecha de curado y masa cilindros concreto de fibra PET (0,2%).

#	Dimensiones (cm)	Fecha de curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 30	5/08/2020	9/08/2020	12.55
2		5/08/2020	9/08/2020	12.38
3		5/08/2020	9/08/2020	12.34
4		5/08/2020	12/08/2020	12.41
5		5/08/2020	12/08/2020	12.42
6		5/08/2020	12/08/2020	12.42
7		5/08/2020	2/09/2020	13.42
8		5/08/2020	2/09/2020	12.46
9		5/08/2020	2/09/2020	12.37

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.4 Resultados fecha de curado y masa cilindros concreto de fibra PET (0,35%)

#	Dimensiones (cm)	Fecha de Curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 30	5/08/2020	9/08/2020	12.35
2		5/08/2020	9/08/2020	12.42
3		5/08/2020	9/08/2020	12.25
4		5/08/2020	12/08/2020	12.17
5		5/08/2020	12/08/2020	12.33
6		5/08/2020	12/08/2020	12.5
7		5/08/2020	2/09/2020	12.56
8		5/08/2020	2/09/2020	12.49
9		5/08/2020	2/09/2020	12.46

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.5 Resultados fecha de curado y masa viguetas de concreto de control.



#	Dimensiones (cm)	Fecha de Curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 15 x 50	21/06/2019	28/06/2019	26.35
2		21/06/2019	28/06/2019	26.2
3		21/06/2019	28/06/2019	26.05
4		21/06/2019	19/07/2019	25.79
5		21/06/2019	19/07/2019	26.18
6		21/06/2019	19/07/2019	26.80

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.6 Resultados fecha de curado y masa viguetas de concreto con fibra Toxement.

#	Dimensiones (cm)	Fecha de Curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 15 x 50	28/06/2019	5/07/2019	25.95
2		28/06/2019	5/07/2019	26.05
3		28/06/2019	5/07/2019	26.1
4		28/06/2019	26/07/2019	25.61
5		28/06/2019	26/07/2019	25.98
6		28/06/2019	26/07/2019	27.24

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.7 Resultados fecha de curado y masa viguetas de concreto de fibra PET (0,2%).

#	Fecha de Curado
---	-----------------

	Dimensiones (cm)	Inicial	Final	Masa final (kg)
1	15 x 15 x 50	5/08/2020	11/03/2744	26.3
2		5/08/2020	11/03/2744	26.75
3		5/08/2020	11/03/2744	26.4
4		5/08/2020	10/10/5276	26.3
5		5/08/2020	10/10/5276	26.1
6		5/08/2020	10/10/5276	27.25

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.8 Resultados fecha de curado y masa viguetas de concreto de fibra PET (0,35%).

#	Dimensiones (cm)	Fecha de Curado		Masa final (kg)
		Inicial	Final	
1	15 x 15 x 50	5/08/2020	11/03/2744	25.95
2		5/08/2020	11/03/2744	26.1
3		5/08/2020	11/03/2744	26.4
4		5/07/2020	26/05/5274	26.1
5		5/07/2020	26/05/5274	26.18
6		5/07/2020	26/05/5274	25.61

Nota: Datos obtenidos en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.9 Resultados de densidad y resistencia cilindros concreto de control

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
---	---------------------	-----------------------------------	---------------	----------------------

1		2.349	333.96	18.90
2		2.467	316.88	17.93
3		2.417	345.83	19.57
4		2.449	399.43	22.60
5	15 x 30	2.415	425	24.05
6		2.449	390.21	22.08
7		2.430	538.3	30.46
8		2.425	535.21	30.29
9		2.423	542.07	30.67
10		2.371	157.36	20.04
11		2.383	166.68	21.22
12		2.320	169.39	21.57
13		2.392	185.95	23.68
14	10 x 20	2.401	196.92	25.07
15		2.399	190.04	24.20
16		2.385	258.7	32.94
17		2.431	234.5	29.86
18		2.392	236.29	30.08

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.10 Resultados de densidad y resistencia cilindros concreto de fibra Toxement.

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 30	2.396	309.06	17.49

2		2.405	341.42	19.32
3		2.330	315.12	17.83
4		2.405	382.57	21.65
5		2.414	382.74	21.66
6		2.424	399.5	22.61
7		2.427	505.19	28.59
8		2.448	592.38	33.52
9		2.437	588.54	33.3
10		2.324	162.55	20.7
11		2.324	161.27	20.53
12		2.324	165.35	21.05
13		2.324	194.48	24.76
14	10 x 20	2.324	199.53	25.4
15		2.292	202.93	25.84
16		2.313	258.92	32.97
17		2.367	244.11	31.08
18		2.354	258.09	32.86

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

➤ Tabla A.11 Resultados de densidad y resistencia cilindros concreto de fibra PET (0,2%).

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1		2.368	291.60	16.50
2	15 x 30	2.335	301.09	17.04
3		2.329	305.03	17.26

4	2.342	367.05	20.77
5	2.343	309.55	17.52
6	2.343	329.69	18.66
7	2.533	500.01	28.29
8	2.350	486.29	27.52
9	2.334	469.36	26.56

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la empresa  
Consultech s.a.s. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.12 Resultados de densidad y resistencia cilindros concreto de fibra PET (0,35%).

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 30	2.330	312.18	17.67
2		2.343	341.22	19.31
3		2.311	329.11	18.62
4		2.296	383.69	21.71
5		2.327	398.72	22.56
6		2.358	410.69	23.24
7		2.370	539.85	30.55
8		2.357	470.24	26.61
9		2.352	500.30	28.31

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la empresa  
Consultech s.a.s. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.13 Resultados de densidad y resistencia viguetas de concreto de control.

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 15 x 50	2.34	20.68	2.76
2		2.33	21.01	2.80

3	2.32	22.60	3.01
4	2.29	22.18	2.96
5	2.33	26.39	3.52
6	2.38	24.69	3.29

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.14 Resultados de densidad y resistencia viguetas de concreto con fibra Toxement.

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 15 x 50	2.31	19.13	2.55
2		2.32	17.76	2.37
3		2.32	18.64	2.49
4		2.28	24.02	3.20
5		2.31	24.20	3.23
6		2.42	23.50	3.13

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la Universidad de la Costa. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.15 Resultados de densidad y resistencia viguetas de concreto de fibra PET (0,2%).

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 15 x 50	2.34	18.60	2.48
2		2.38	17.20	2.29
3		2.35	19.70	2.63
4		2.34	21.60	2.88

5	2.32	23.80	3.17
6	2.42	23.30	3.11

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la empresa Consultech s.a.s. Fuente: Elaboración propia.

- Tabla A.16 Resultados de densidad y resistencia viguetas de concreto de fibra PET (0,35%).

#	Dimensiones (cm)	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	15 x 15 x 50	2.31	18.40	2.45
2		2.32	18.60	2.48
3		2.35	19.70	2.63
4		2.32	27.00	3.60
5		2.33	23.20	3.09
6		2.28	18.60	2.48

Nota: Densidades y resistencia obtenida en laboratorio de la empresa Consultech s.a.s. Fuente: Elaboración propia.

## Anexo B. Registros fotográficos complementarios

- Anexo B.1 Ensayos de laboratorio para la caracterización de los materiales

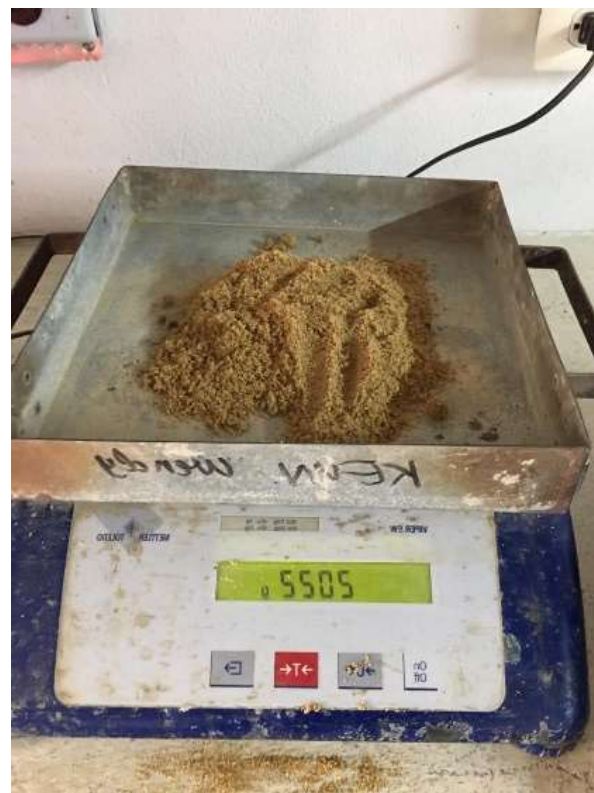
















➤ Anexo B.2. elaboración del concreto de control









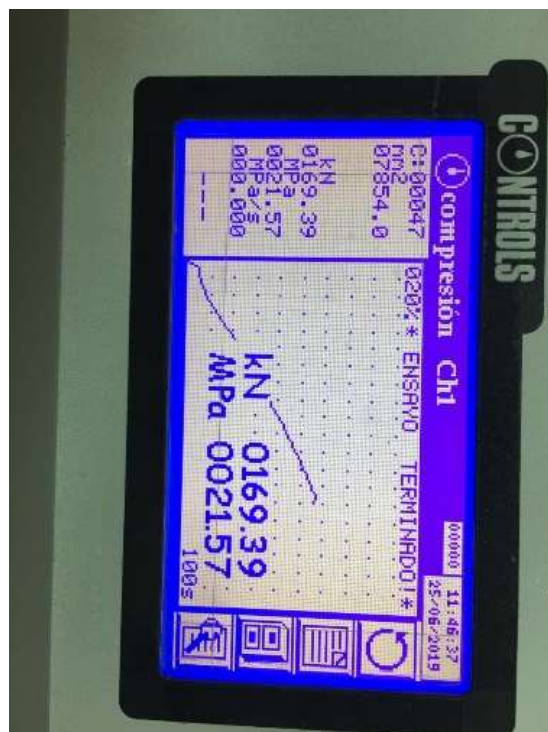




- Anexo B.3. Ensayos a compresión complementarios concreto control









➤ Anexo B.4. Curado de viguetas



➤ Anexo B.5. Concreto con fibra Toxement







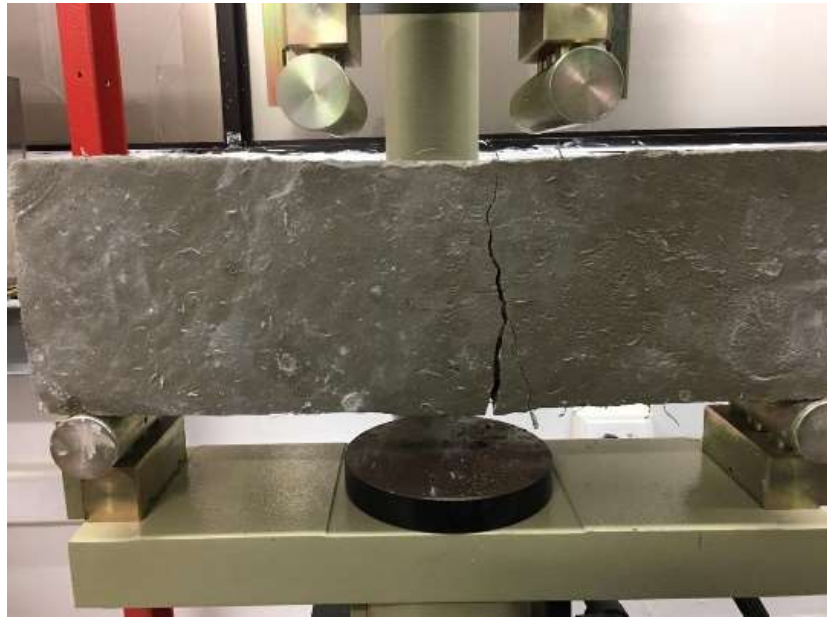




➤ Anexo B.6. Ensayo de viguetas







- Anexo B.7. Concretos en el laboratorio de Consultech S.A.S.







